



TUGAS AKHIR - MO141326

*ANALISIS FATIGUE LIFE SAMBUNGAN KRITIS PADA  
PLATFORM ATAKA B DENGAN RETAK SEMI-  
ELLIPTICAL MENGGUNAKAN LINEAR ELASTIC  
FRACTURE MECHANICS (LEFM)*

Alfino Rifqi Fahmi

NRP 4312100058

Dosen Pembimbing:

Nur Syahroni, S.T., M.T., Ph.D

Ir. Handayanu, M.Sc., Ph.D

Jurusan Teknik Kelautan

Fakultas Teknologi Kelautan

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2016



FINAL PROJECT - MO141326

*FATIGUE LIFE ANALYSIS CRITICAL JOINT PLATFORM  
ATTAKA B WITH SEMI-ELLIPTICAL CRACK USING  
LINEAR ELASTIC FRACTURE MECHANICS (LEFM)*

Alfino Rifqi Fahmi  
NRP 4312100058

Supervisor :  
Nur Syahroni, S.T., M.T., Ph.D  
Ir. Handayanu, M.Sc., Ph.D

Department of Ocean Engineering  
Faculty of Marine Technology  
Sepuluh Nopember Institute of Technology  
Surabaya  
2016

**Analisis *Fatigue Life* Sambungan Kritis Pada *Platform* Attaka B  
dengan Retak *Semi-Elliptical* Menggunakan *Linear Elastic*  
*Fracture mechanics (LEFM)***

**TUGAS AKHIR**




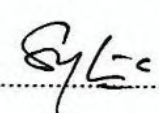

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
pada Program Studi S-1 Jurusan Teknik Kelautan  
Fakultas Teknologi Kelautan  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

Alfino Rifqi Fahmi

NRP. 4312 100 058

Disetujui oleh :

- |   |  |                |
|---|--|----------------|
| 1. Nur Syahroni, ST, M.T., Ph.D.            |  | (Pembimbing 1) |
| <hr style="border-top: 1px dotted black;"/> |  |                |
| 2. Ir. Handayanu, M.Sc., Ph.D.              |   | (Pembimbing 2) |
| <hr style="border-top: 1px dotted black;"/> |  |                |
| 3. Haryo Dwito Armono, S.T, M.Eng., Ph.D.   |  | (Penguji 1)    |
| <hr style="border-top: 1px dotted black;"/> |  |                |
| 4. Silvianita, S.T., M.Sc., Ph.D.           |   | (Penguji 2)    |
| <hr style="border-top: 1px dotted black;"/> |  |                |
| 5. Dirla Marina, S.T, M.T.                  |   | (Penguji 3)    |
| <hr style="border-top: 1px dotted black;"/> |  |                |

SURABAYA, JULI 2016

**ANALISIS *FATIGUE LIFE* SAMBUNGAN KRITIS PADA *PLATFORM*  
ATTAKA B DENGAN RETAK *SEMI-ELLIPTICAL* MENGGUNAKAN  
*LINEAR ELASTIC FRACTURE MECHANICS (LEFM)***

**Nama Mahasiswa : Alfino Rifqi Fahmi**  
**NRP : 4312 100 058**  
**Jurusan : Teknik Kelautan FTK - ITS**  
**Dosen Pembimbing : Nur Syahroni, S.T., M.T., Ph.D.**  
**Ir. Handayanu, M.Sc., Ph.D**

**ABSTRAK**

Selama masa operasinya, *fixed jacket structure* terkena beban siklis dari gelombang dan angin yang dapat menyebabkan retak (*crack*). Retak ini lama-kelamaan akan mengalami perambatan hingga mencapai ukuran retak kritis yang dapat menyebabkan kegagalan pada struktur. Oleh karena itu, perlu adanya analisis umur kelelahan sebagai evaluasi untuk mencegah terjadinya kegagalan. *Fracture mechanics* merupakan metode untuk menentukan perilaku kepecahan pada suatu struktur menggunakan parameter-parameter seperti tegangan (*stress*) dan ukuran retak (*crack size*). Pada tugas akhir ini, *joint* kritis 401 pada *platform* Attaka B digunakan dalam analisis umur kelelahan. Dengan asumsi bentuk *crack semi-elliptical* dengan menggunakan metode *linear elastic fracture mechanics*. Hasil analisis didapatkan nilai *Stress Intensity Factor* (SIF) pada kedalaman retak ,a, 0,75 mm sebesar 2,15 MPa $\sqrt{\text{m}}$  menggunakan persamaan *surface crack*. Kecepatan perambatan retak pada kedalaman retak ,a, 0,75 mm memiliki nilai sebesar 2,7 E-09 in/cycle untuk perhitungan dengan *software ANSYS* dan 2,0 E-09 in/cycle untuk perhitungan manual. Hasil analisis umur kelelahan sebesar 1,1 E+08 cycle dengan *software ANSYS* dan 1,0 E+08 dengan perhitungan manual.

Kata kunci : *fracture mechanic, stress intensity factor*, kecepatan perambatan retak, *joint* kritis, *linear elastic fracture mechanics*

***FATIGUE LIFE ANALYSIS CRITICAL JOINT PLATFORM ATTAKA B  
WITH SEMI-ELLIPTICAL CRACK USING LINEAR ELASTIC FRACTURE  
MECHANICS (LEFM)***

**Name of Student** : Alfino Rifqi Fahmi  
**NRP** : 4312100058  
**Department** : Ocean Engineering - ITS  
**Supervisor** : Nur Syahroni, S.T., M.T., Ph.D.  
Ir. Handayanu, M.Sc., Ph.D

**ABSTRACT**

*Fixed jacket platform is one of offshore structure that support exploration and exploitation of oil and gas. During the operation, fixed jacket platform exposed to cyclic load from waves and wind that may cause crack. This crack lead to failure of fixed jacket platform when crack reach a critical size. Therefore, fatigue life analysis is necessary to be performed to prevent failure. Fracture mechanics is a method to determine the behavior of fracture to structure using Stress Intensity Factor (SIF) parameter which include apllied stress and crack size ( $a$ ). In this final project, critical joint 401 Attaka B platform used in the fatigue life analysis. Assuming the form of a semi-elliptical crack by using Linear Elastic Fracture Mechanics (LEFM). The result of the analysis obtained that SIF crack size , $a$ , 0,75 mm is 2,15 MPa  $\sqrt{m}$ . Crack propagation rate at crack size , $a$ , 0,75 mm has a value of 2,7 E-09 in/cycle using ANSYS and 2,0 E-09 in/cycle for manual calculation. The result of the fatigue life analysis 1,1 E+08 using ANSYS and 1,0 E+08 for manual calculation.*

*keywords : fracture mechanic, stress intensity factor, kecepatan perambatan retak, joint kritis, linear elastic fracture mechanics*

## DAFTAR ISI

ABSTRAK .....	iv
KATA PENGANTAR .....	vi
UCAPAN TERIMA KASIH.....	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR .....	xi
DAFTAR TABEL.....	xiii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiv
DAFTAR SIMBOL.....	xv
BAB 1 .....	1
1.1    Latar Belakang Masalah .....	1
1.2    Perumusan Masalah.....	3
1.3    Tujuan.....	3
1.4    Manfaat.....	3
1.5    Batasan Masalah.....	3
1.6    Sistematika Penulisan .....	4
BAB 2 .....	5
2.1    Tinjauan Pustaka .....	5
2.2    Dasar Teori .....	6
2.2.1 <i>Fixed Jacket Platform</i> .....	6
2.2.2 <i>Tubular Joint</i> .....	8
2.2.3 <i>Hot Spot Stress</i> .....	9
2.2.4    Retak ( <i>crack</i> ) dan Perambatan Retak.....	9
2.2.5    Analisis Kelelahan .....	11
2.2.6 <i>Fracture Mechanics</i> .....	15
2.2.7    Mode Displasmen .....	18

2.2.8	<i>Stress Intensity Factor (SIF)</i> .....	19
2.2.9	Kecepatan Perambatan Retak.....	20
2.2.10	Analisis Umur Kelelahan <i>Fracture Mechanics</i> .....	24
2.2.11	Metode Elemen Hingga.....	25
BAB 3	.....	29
3.1	Diagram Alir Analisis Umur Kelelahan .....	29
3.2	Diagram Alir Pemodelan Sambungan Kritis.....	33
3.3	Data Pendukung .....	35
3.3.1	Profil <i>platform</i> .....	35
3.3.2	Data Lingkungan.....	36
3.3.3	Data Tanah .....	39
3.3.4	<i>Marine growth</i> .....	39
3.3.5	<i>Splash zone</i> .....	39
3.3.6	Material .....	39
BAB 4	.....	41
4.1	Pemodelan Global <i>Platform Attaka B</i> .....	41
4.1.1	Validasi <i>Selfweight</i> .....	41
4.1.2	Validasi <i>Center of gravity (COG)</i> .....	42
4.2	Analisis <i>Inplace</i> .....	42
4.3	Analisis <i>Fatigue menggunakan Cumulative Damage</i> .....	43
4.4	Pemodelan Sambungan Kritis .....	45
4.4.1	<i>Meshing</i> .....	46
4.5	<i>Input</i> Pembebanan pada Sambungan Kritis.....	47
4.5.1	Penentuan Sarat Batas .....	47
4.5.2	Pembebanan pada Model .....	48
4.6	Pemodelan <i>Initial Crack</i> .....	49

4.6.1	<i>Hot Spot Stress</i> .....	49
4.6.2	<i>Meshing Sensitivity</i> .....	50
4.6.3	<i>Initial Crack Joint Kritis</i> .....	52
4.7	Perhitungan <i>Stress Intensity Factor (SIF)</i> .....	53
4.7.1	Perhitungan SIF dengan <i>ANSYS</i> .....	53
4.7.2	Perhitungan SIF manual .....	54
4.8	Perhitungan Kecepatan Perambatan Retak.....	56
4.9	Perhitungan Umur Kelelahan .....	58
4.9.1	Metode Cumulative Damage .....	58
4.9.2	Metode Fracture Mechanics .....	59
4.10	Perbandingan Umur Kelelahan .....	60
BAB 5	.....	63
5.1	Kesimpulan.....	63
5.2	Saran .....	63
DAFTAR PUSTAKA	.....	65
LAMPIRAN		
BIODATA PENULIS		



## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 <i>Fixed Jacket Structure</i> .....	1
Gambar 2.1 <i>Jacket Platform</i> .....	6
Gambar 2.2 Konfigurasi Tubular Joint .....	8
Gambar 2.3 Perambatan Retak.....	10
Gambar 2.4 Kurva S-N .....	12
Gambar 2.5 Struktur Geometris Tubular Member Tipe K.....	14
Gambar 2.6 Faktor Penyebab Struktur Rentan .....	15
Gambar 2.7 Mode Displasmen pada Permukaan Retak .....	18
Gambar 2.8 Grafik Perbandingan $a/2c$ dan $\sigma/\sigma_{ys}$ .....	20
Gambar 2.9 Perambatan Retak.....	21
Gambar 2.10 Laju Perambatan <i>Crack</i> pada <i>Martensitic Steel</i> .....	22
Gambar 2.11 Laju Perambatan Retak untuk Material <i>Ferrite-Perlite</i> .....	23
Gambar 2.12 Laju Perambatan Retak Material <i>Aluminium and Titanium Alloy</i> ..	24
Gambar 2.13 Bentuk Elemen SOLID 45 .....	25
Gambar 3.1 Diagram Alir Analisis Umur Kelelahan.....	29
Gambar 3.2 Diagram Alir Pemodelan Sambungan Kritis.....	33
Gambar 4.1 Pemodelan Global <i>Platform</i> Attaka B.....	41
Gambar 4.2 Letak <i>Joint-Joint</i> Analisis <i>Fatigue</i> .....	44
Gambar 4.3 Pemodelan <i>Joint</i> Kritis 401 .....	46
Gambar 4.4 Bagian-bagian <i>Joint</i> Kritis .....	46
Gambar 4.5 <i>Meshing</i> pada <i>Joint</i> Kritis 401 .....	47
Gambar 4.6 <i>Fixed Support Joint</i> 401 .....	47
Gambar 4.7 Ujung Tiap-Tiap <i>Member</i> Kritis .....	49
Gambar 4.8 Hasil <i>Input</i> Pembebanan pada ANSYS 16.0.....	49
Gambar 4.9 <i>Hot Spot Stress Joint</i> Kritis 401 .....	50
Gambar 4.10 <i>Hot Spot Stress Joint</i> Kritis 401 Detail .....	50
Gambar 4.11 Titik Acuan <i>Meshing Sensitivity</i> .....	51
Gambar 4.12 Kurva <i>Meshing Sensitivity</i> .....	51
Gambar 4.13 Element <i>Meshing</i> 10 mm .....	52
Gambar 4.14 <i>Initial Crack Joint</i> Kritis .....	52
Gambar 4.15 Contoh Hasil SIF pada ANSYS.....	54

Gambar 4.16 Nilai Q perhitungan SIF manual .....	55
Gambar 4.17 Kurva Kecepatan Perambatan Retak.....	57

## DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Data Kedalaman <i>Platform</i> .....	36
Tabel 3.2 Data Angin .....	36
Tabel 3.3 Data Gelombang .....	37
Tabel 3.4 Persebaran Gelombang .....	37
Tabel 3.5 Profil Arus.....	38
Tabel 3.6 Beban <i>Topside</i> .....	38
Tabel 3.7 Data Kapasitas <i>Pile</i> .....	39
Tabel 3.8 Data <i>Marine growth</i> .....	39
Tabel 4.1 Validasi <i>Selfweight</i> .....	42
Tabel 4.2 Validasi COG .....	42
Tabel 4.3 <i>Joint Can Sumary</i> .....	43
Tabel 4.4 <i>Member</i> dengan <i>Service life</i> Terendah.....	43
Tabel 4.5 <i>Cumulative Damage</i> .....	45
Tabel 4.6 Profile <i>member</i> pada <i>joint 401</i> .....	45
Tabel 4.7 Gaya Pembebanan <i>Member</i> pada <i>Joint 401</i> .....	48
Tabel 4.8 Hasil <i>Meshing Sensitivity</i> .....	51
Tabel 4.9 Perbandingan Panjang <i>Crack</i> dengan Kedalaman Retak.....	53
Tabel 4.10 Nilai SIF tiap Penambahan Panjang <i>Crack</i> .....	53
Tabel 4.11 Nilai SIF Perhitungan Manual .....	56
Tabel 4.12 Kecepatan Perambatan Retak.....	57
Tabel 4.13 Perhitungan Umur Kelalahan.....	59
Tabel 4.14 Perbandingan Metode <i>ANSYS</i> dan Perhitungan Manual.....	60
Tabel 4.15 Perbandingan Umur Kelelahan .....	61

## DAFTAR LAMPIRAN

- LAMPIRAN A Hasil Analisis Inplace
- LAMPIRAN B Hasil Analisis Fatigue
- LAMPIRAN C Model *Crack* dan Nilai *Stress Intensity Factor*
- LAMPIRAN D Perhitungan *Stress Intensity Factor*, Kecepatan Perambatan Retak, dan *Fatigue Life*
- LAMPIRAN E Prosedur *Running Stress Intensity Factor* menggunakan ANSYS

16.0

## DAFTAR SIMBOL

$a$	= kedalaman retak (mm atau in)
$a_0$	= kedalaman retak awal (mm atau in)
$a_f$	= kedalaman retak akhir (mm atau in)
$d$	= diameter luar brace
$da/dN$	= kecepatan perambatan retak
$g$	= jarak antar ujung brace
$m$	= konstanta material
$m$	= kemiringan ( <i>slope</i> ) kurva S-N
$t$	= ketebalan brace
$C$	= konstanta material
$D$	= diameter luar chord
$D$	= <i>cumulative damage</i>
$E$	= modulus young
$L$	= panjang chord
$M_K$	= Faktor koreksi <i>back free surface</i>
$N$	= Jumlah siklus kejadian beban
$Q$	= Faktor koreksi <i>front free surface</i>
$R$	= rasio tegangan = $\frac{\sigma_{max}}{\sigma_{min}}$
$S$	= tegangan maksimum
$S_{nom}$	= tegangan nominal
$SCF$	= <i>stress concentraion factor</i>
$T$	= ketebalan chord
$\{d\}$	= matriks deformasi
$\{f\}$	= matriks gaya elemen
$\{F\}$	= matriks gaya global
$[k]$	= matriks kekakuan elemen
$[K]$	= matriks kekakuan global
$\Delta\sigma$	= <i>stress range</i>
$\Delta K$	= perubahan <i>stress intensity factor</i> (MPa $\sqrt{m}$ atau ksi $\sqrt{in}$ )
$\sigma$	= tegangan

$\sigma_x$	= tegangan normal (MPa)
$\varepsilon$	= regangan
$\tau_{xy}$	= tegangan geser bidang x arah sumbu y (MPa)
$r$	= jarak <i>cracktip</i> dengan <i>node</i> yang ditinjau (m)
$\theta$	= sudut antara <i>node</i> yang ditinjau dengan sumbu x (degree)
$\nu$	= <i>Poisson's Ratio</i>

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang Masalah

Dalam industri minyak dan gas bumi, bangunan lepas pantai menjadi suatu alat utama guna mendukung proses produksi dan eksploitasi minyak dan gas bumi. Terdapat berbagai jenis bangunan lepas pantai yang mendukung proses produksi minyak dan gas bumi. Salah satu jenis bangunan lepas pantai yang digunakan ialah *fixed jacket structure* seperti yang terlihat pada Gambar 1.1 di bawah ini.



**Gambar 1.1** *Fixed Jacket Structure* ([drillingcontractor.org](http://drillingcontractor.org))

*Jacket structure* merupakan struktur yang terbuat dari baja *tubular*. Biasanya *jacket structure* memiliki tiga, empat, enam atau delapan *jacket legs* yang berfungsi mengirimkan beban lingkungan dan beban *topside* menuju ke *pile* yang telah terpancang di dasar laut (*seabed*) (Chakrabarti, 2005).

Dikarenakan terbuat dari baja *tubular* maka salah satu cara penyambungannya dengan menggunakan teknik pengelasan (*welding*). Menurut *American Welding Society* (AWS), pengelasan didefinisikan sebagai proses penyambungan yang menghasilkan satu bagian yang menyatu, dengan memanaskan material yang akan disambung sampai pada suhu pengelasan tertentu, dengan atau tanpa penekanan, dan dengan atau tanpa logam pengisi. Dalam proses pengelasan biasanya ditemukan

adanya cacat las yang terjadi. Cacat las yang terjadi diakibatkan oleh beberapa faktor seperti, kondisi lingkungan, kemampuan *welder*, kualitas material, dan lain-lain.

Selama masa operasi, *jacket structure* menerima beban siklis dari gelombang maupun angin. Dua beban tersebut merupakan beban dominan yang mengenai *jacket structure*. Beban siklis merupakan faktor utama penyebab terjadinya kelelahan pada *jacket structure*. Apabila suatu *jacket structure* telah melewati umur kelelahannya maka struktur tersebut akan mengalami retak awal (*initiation crack*). Retak awal ini jika terkena beban siklis maka akan merambat dan membesar. Perambatan retak (*crack propagation*) yang tidak stabil atau dengan kata lain perambatan retak sangat cepat dapat mengakibatkan *fast fracture*. *Fast fracture* harus diantisipasi agar *jacket structure* tetap aman digunakan untuk kegiatan produksi dan eksploitasi.

Oleh karena itu, diperlukan adanya suatu evaluasi sebelum terjadinya kegagalan pada struktur. Salah satu cara yang digunakan oleh para *engineer* dan *expert* yaitu dengan cara analisis umur kelelahan (*fatigue analysis*). Terdapat dua cara umum yang digunakan dalam analisis umur kelelahan, yaitu metode *cumulative damage* dan *fracture mechanics*. Pada tugas akhir ini, *fracture mechanics* digunakan dalam analisis kelelahan pada salah satu *jacket structure*. *Fracture mechanics* adalah metode perhitungan umur kelelahan struktur dengan retak awal (*initiation crack*). Terdapat dua cara dalam *fracture mechanics* yaitu *Linear Elastic Fracture mechanics* (LEFM) dan *Elastic Plastic Fracture mechanics* (EPFM). Pada tugas akhir ini metode yang digunakan ialah *Linear Elastic Fracture mechanics* (LEFM).

Studi kasus yang digunakan dalam tugas akhir ini adalah *platform* Attaka B milik Chevron Indonesia Company. *Platform* ini memiliki 6 kaki *jacket* dengan *grouted piles*. Attaka B berdiri pada kedalaman 188 ft. Terdapat dua level *deck* yang berada di *platform* Attaka B. *Deck* tersebut antara lain *main deck* dan *cellar deck*. Di kedua *deck* tersebut terdapat beberapa peralatan yang menunjang produksi dan eksploitasi



minyak dan gas bumi. *Platform* ini juga memiliki peralatan pendukung seperti : 11 *risers*, 1 *boat landing*, 24 *wells conductor* dan 3 *barge-bumpers*.

## 1.2 Perumusan Masalah

Rumusan masalah yang akan dijabarkan pada tugas akhir ini, antara lain:

- a. Berapa nilai *stress intensity factor* (SIF) pada sambungan kritis ?
- b. Berapa *crack propagation rate* pada sambungan kritis ?
- c. Berapa umur kelelahan sambungan kritis pada *platform* Attaka B dengan menggunakan *fracture mechanics*?

## 1.3 Tujuan

Tugas akhir ini memiliki tujuan sebagai berikut :

- a. Memodelkan dan menghitung nilai *stress intensity factor* (SIF) pada sambungan kritis.
- b. Menghitung *crack propagation rate* pada sambungan kritis.
- c. Menghitung umur kelelahan sambungan kritis pada *platform* Attaka B dengan menggunakan *fracture mechanics*.

## 1.4 Manfaat

Dengan dilakukannya analisis umur kelelahan pada sambungna kritis maka terdapat beberapa manfaat yang dapat diambil, antara lain :

- a. Mengetahui langkah-langkah analisis umur kelelahan dengan *fracture mechanics*.
- b. Mengetahui umur kelelahan pada sambungan kritis dengan *fracture mechanics*.

## 1.5 Batasan Masalah

Batasan masalah yang digunakan dalam tugas akhir ini meliputi :

- a. Studi kasus yang digunakan dalam penelitian ini ialah *platform* Attaka B milik Chevron Indonesia Company.
- b. Bentuk retak awal (*initial crack*) pada sambungan kritis ialah *semi-elliptical*.
- c. Deformasi *crack* menggunakan mode I.
- d. Teknik pengelasan dan tegangan sisa diabaikan.

- e. Beban yang digunakan ialah beban aksial.
- f. Perhitungan umur kelelahan menggunakan metode *linear elastics fracture mechanics* (LEFM).
- g. Analisis umur kelelahan dan nilai *stress intensity factor* (SIF) menggunakan *software ANSYS* version 16.0.
- h. Kedalaman retak awal (*initiation crack*) sebesar 0,75 mm (ABS,2003).

## **1.6 Sistematika Penulisan**

BAB I, Pendahuluan, menjelaskan tentang latar belakang penulisan, permasalahan yang dibahas dalam penulisan, apa yang akan dilakukan, batasan masalah, tujuan dan manfaat penulisan tugas akhir.

BAB II, Tinjauan pustaka dan dasar teori, menjelaskan tentang dasar teori dan tinjauan pustaka yang menjadi sumber referensi dalam tugas akhir ini dibahas dalam bab dua.

BAB III, Metodologi Penelitian, menjelaskan metodologi penelitian yang akan digunakan untuk mengerjakan tugas akhir. Penjelasan tentang langkah-langkah analisis serta langkah permodelan dengan *software*.

BAB IV, Analisis data dan pembahasan, membahas hasil dari analisis yang telah dilakukan pada penelitian, meliputi analisis hasil, dan pembahasan hasil analisis.

BAB V, Kesimpulan dan saran, berisi tentang kesimpulan setelah dilakukan analisis dan saran serta rekomendasi dari hasil pengerjaan tugas akhir.

Daftar pustaka menampilkan seluruh informasi dan dokumen tertulis yang dijadikan landasan dan pengembangan penelitian.

## BAB 2

### TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

#### 2.1 Tinjauan Pustaka

*Fracture mechanics* merupakan metode analisis umur kelelahan struktur dengan mempertimbangkan retak awal (*initiation crack*). Karena suatu struktur dalam masa operasi selalu terkena beban lingkungan yang bersifat siklis maka, retak awal tersebut dapat merambat. Akibat perambatan tersebut ukuran *crack* dapat mencapai nilai kritis yang mengakibatkan kegagalan struktur. Oleh karena itu, diperlukan usaha untuk memprediksi berapa lama sebuah struktur dapat bertahan dari terbentuknya *initial crack* hingga struktur mengalami kegagalan (*failure*). Salah satu usahanya ialah analisis umur kelelahan dengan menggunakan *fracture mechanics*.

Akbari (2005) telah melakukan penelitian mengenai analisis umur kelelahan *tubular joint* tipe T dengan menggunakan metode *elastic plastic fracture mechanics (EPFM)*. Studi kasus yang digunakan ialah *joint* kritis pada struktur *jack-up* Hang Tuah Mogpu milik Conoco Indonesia Inc. Ltd. Dengan asumsi terjadinya retak awal berbentuk eliptis. Metode *fracture mechanics* yang digunakan ialah elastis plastis. Hasil umur kelelahan struktur yang didapat sebesar 125,2 tahun.

Analisis umur kelelahan *tubular joint* tipe T juga telah pada penelitian Annastia (2005). Retak awal diasumsikan berbentuk *semi-elliptical* dan berada diantara *saddle* dengan las pada *chord*. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui nilai *stress intensity factor (SIF)*, perambatan retak (*crack propagation*), dan umur kelelahan *platform* Hangtuah MogPU. Nilai *stress intensity factor (SIF)* yang didapat sebesar 2,47 ksi $\sqrt{\text{in}}$ , perambatan *crack* 5,06 E-08 in/cycles, dan umur kelelahan struktur tersebut yaitu 93 tahun.

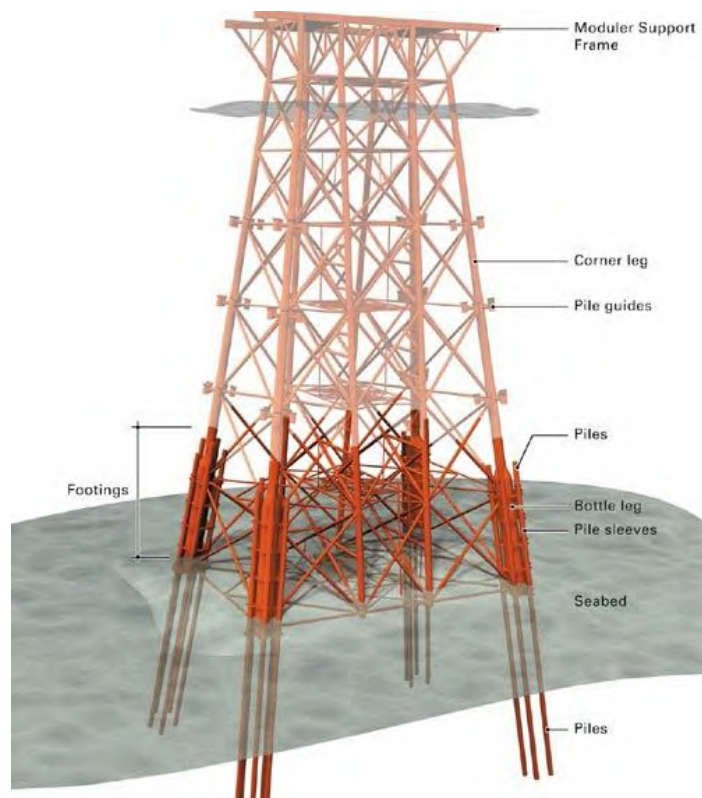
Pada penelitian tugas akhir ini dilakukan analisis umur kelelahan (*fatigue life*) *tubular* pada *joint* paling kritis *platform* Attaka B menggunakan *fracture mechanics*. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui nilai *stress intensity factor*

(SIF), *crack propagation rate*, serta umur kelelahan pada *platform* tersebut. Analisis umur kelelahan ini nantinya akan menggunakan metode *linear elastics fracture mechanics (LEFM)*.

## 2.2 Dasar Teori

### 2.2.1 Fixed Jacket Platform

*Fixed jacket platform* merupakan salah satu bangunan lepas pantai yang digunakan dalam eksplorasi dan eksploitasi minyak dan gas bumi. *Fixed jacket platform* dibuat dengan menggunakan baja *tubular* yang saling menyambung sedemikian hingga dan juga dipancang menggunakan *pile* agar dapat menahan beban *equipment*, *liveload* dan beban lingkungan yang menimpa struktur. *Platform* ini biasanya menyokong 2 hingga 3 *deck* yang biasanya terdapat peralatan produksi dan *drilling*. Umumnya, *platform* jenis ini dapat digunakan hingga pada kedalaman 500-600 ft. Namun, pada kenyataannya terdapat beberapa *jacket platform* yang dipasang lebih dari 500-600 ft. Misalnya, salah satu *jacket platform* dipasang di teluk mexico tepatnya di *cognac field* dengan kedalaman perairan mencapai 1000 ft. Gambar 2.1 merupakan contoh dari *fixed jacket platform*.



Gambar 2.1 Jacket Platform (offshore-technology.com)

*Fixed jacket platform* memiliki perbedaan antara satu dengan lainnya. Perbedaan tersebut terdapat pada jumlah kaki, bentuk *bracing*, serta fungsi dari *platform* tersebut. Biasanya kaki *jacket* yang dimiliki *fixed jacket platform* memiliki tiga, empat, enam atau delapan kaki *jacket*. *Jacket legs* berfungsi mengirimkan beban lingkungan dan beban *topside* menuju ke *pile* yang telah terpancang di dasar laut (*seabed*). Berdasarkan fungsinya *fixed jacket platform* terbagi menjadi 3 yaitu (Chakrabarti,2005) :

- a. *Drilling structure*
- b. *Production structure*
- c. *Storage structure*

*Fixed jacket platform* terdiri dari beberapa bagian utama antara lain (Murdjito,2014) :

- a. *Topside / deck*

*Topside* berfungsi sebagai tempat untuk meletakkan *equipment* yang mendukung proses produksi minyak dan gas bumi serta sebagai tempat seluruh kegiatan para *crew* yang berada di *fixed jacket platform*. *Topside* terdiri dari *main girder*, *second girder*, dan *plate*. *Topside* atau *deck* ini biasanya terdiri dari 2 sampai 3 level (tingkat) yaitu *main deck*, *cellar deck*, dan *mezanine deck*.

- b. *Jacket*

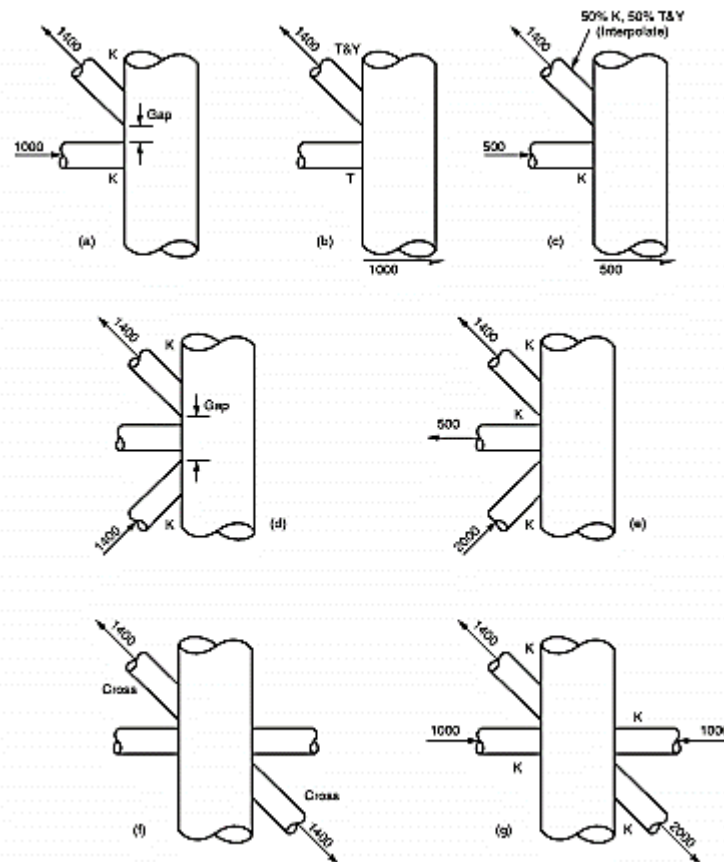
*Jacket* terbuat dari baja *tubular* yang saling menyambung dengan menggunakan teknik pengelasan. *Jacket* berfungsi untuk penyokong *deck* dan menyalurkan beban-beban yang mengenai *jacket* seperti beban *topside*, *liveload*, beban lingkungan, dan lain-lain ke *pile* yang terpancang ke dalam *seabed*.

- c. *Pile / foundation*

*Pile* digunakan untuk menahan beban-beban yang mengenai struktur. *Pile* ini terpancang pada *seabed* dengan kedalaman tertentu agar mampu menahan seluruh beban yang bekerja pada struktur. Pada pemasangan *pile* terdapat dua macam cara yaitu *grouted pile* dan *ungrouted pile*. *Grouted pile* yaitu menambahkan perekat maupun material lain kedalam sela-sela antara *jacket leg* dengan *pile*. Sedangkan, *ungrouted pile* yaitu metode pemasangan *pile* yang tidak menggunakan material kedalam sela-sela antara *jacket pile* dengan *pile*.

### 2.2.2 Tubular Joint

Struktur dengan bentuk *tubular member* menjadi bagian yang sangat penting dalam konstruksi *jacket*, hal ini dikarenakan *tubular member* langsung terkena beban gelombang, arus, dan berperan penting dalam kekuatan struktur. Penggunaan *tubular member* dapat memberikan masalah pada bagian sambungan, dimana konsentrasi tegangan dapat muncul. Dalam codes API RP 2A WSD *tubular joint* diklasifikasikan berdasarkan susunan geometrisnya yaitu tipe K, T, Y dan X. Gambar 2.2 di bawah ini merupakan contoh konfigurasi *tubular joint* :



Gambar 2.2 Konfigurasi Tubular Joint (API RP 2A WSD,2000)

Pada setiap tubular joint akan bekerja gaya-gaya akibat dari pembebanan yang menimpa *jacket platform*. Gaya-gaya ini diantaranya ialah, gaya aksial, gaya geser, *in-plane bending*, *out-of-plane bending*, dan momen torsi. gaya aksial, gaya geser, *in-plane bending*, *out-of-plane bending*, dan momen torsi.

### 2.2.3 Hot Spot Stress

*Hot spot stress* adalah lokasi pada suatu sambungan (*tubular*) dimana terjadi tegangan tarik / tekan maksimum. *Hot spot stress* dapat mengakibatkan kelelahan pada struktur semakin cepat. Secara umum diidentifikasi ada tiga tipe tegangan dasar yang menyebabkan munculnya *hot spot stress*:

- a. Tipe A, disebabkan oleh gaya-gaya aksial dan momen-momen yang merupakan hasil dari kombinasi *frame* dan *truss jacket*.
- b. Tipe B disebabkan detail-detail sambungan struktur seperti geometri sambungan yang kurang memadai, variasi kekakuan yang bervariasi disambungan dan lain-lain.
- c. Tipe C, disebabkan oleh faktor metalurgis yang dihasilkan dan kesalahan pengelasan, seperti *undercut*, *porosity*, dan lain-lain.

*Hot spot stress* biasa terjadi pada *joint* tepatnya pada daerah las-lasan. Lama-kelamaan *hot spot stress* dapat memacu timbulnya retak (*crack*), dengan beban siklis yang terus menimpa struktur selama masa operasinya maka retak (*crack*) ini akan mengalami perambatan hingga pada titik kritis yang menyebabkan kegagalan pada struktur.

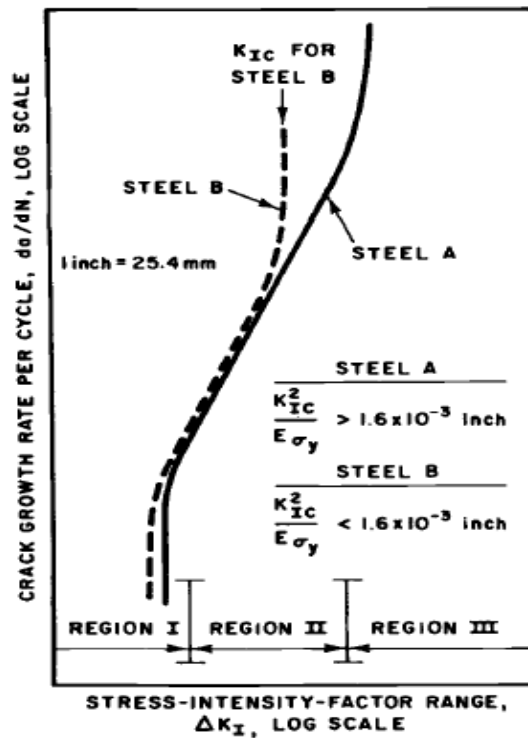
### 2.2.4 Retak (*crack*) dan Perambatan Retak

Retak merupakan salah satu cacat yang dapat terjadi pada saat pengelasan berlangsung. Retak menjadi faktor utama terjadinya kegagalan struktur. Kegagalan terjadi saat retak mengalami beban siklis yang membuat retak berubah ukuran hingga mencapai ukuran tertentu dan menyebabkan kepecahan. Retak yang menyebabkan kepecahan terjadi dalam beberapa tahap, antara lain :

#### 1. Retak awal (*initial crack*)

Retak merupakan salah satu cacat yang terjadi pada pengelasan. Cacat pada struktur dapat terjadi pada saat fabrikasi maupun saat masa operasi struktur. Pada saat fabrikasi cacat las dapat disebabkan berbagai macam hal seperti kualitas *welder*, temperatur, arus, kualitas material, maupun faktor lingkungan. Sedangkan pada saat masa operasi cacat terjadi karena kelelahan struktur maupun fluktuasi tegangan pada bagian yang telah mengalami korosi. Kedalaman retak awal yang digunakan dalam penelitian ini sebesar 0,5 mm.

## 2. Perambatan retak (*crack propagation*)



Gambar 2.3 Perambatan Retak (Barsom,1977)

Perambatan retak terjadi akibat beban siklis yang dialami struktur. Berdasarkan Gambar 2.3 perambatan retak dibagi menjadi 3 *region*.

### a. *Region I*

Disebut juga dengan *region fatigue-treshold* ( $K_{th}$ ). Perambatan terjadi apabila nilai *stress intensity factor* ( $\Delta K$ ) lebih besar dari pada  $K_{th}$ . Pada *region* ini tidak terjadi perambatan retak dikarenakan nilai  $\Delta K < K_{th}$ . Nilai  $\Delta K$  harus lebih besar dari nilai  $\Delta K_{th}$  untuk memungkinkan terjadinya perambatan retak. Nilai  $da/dN$  antara *region I* dan *region II* adalah :

$$\frac{da}{dN} = c(\Delta K^m - \Delta K + h^m) \quad (2.1)$$

### b. *Region II*

*Region II* merupakan *region* yang mengalami perambatan retak yang stabil. Perambatan retak dapat dihitung dengan menggunakan hukum paris-erdogan :

$$\frac{da}{dN} = C (\Delta K)^m \quad (2.2)$$



Keterangan :

$da/dN$  = kecepatan perambatan retak

C dan m = konstanta material

$\Delta K$  = perubahan *stress intensity factor*

c. *Region III*

*Region* yang perambatan retaknya tidak stabil dan terjadinya kepecahan. Bila *stress intensity factor* ( $K_I$ ) sama dengan *stress intensity factor* pada kondisi kritis ( $K_{IC}$ ) maka struktur akan mengalami kepecahan. Nilai  $da/dN$  antara *region I, II* dan *III* (bila efek R diperhitungkan) adalah :

$$\frac{da}{dN} = \frac{\Delta K^2}{4\pi\sigma_y E} \left\{ \frac{(\Delta K - \Delta K_c) (1-R)}{(1-R) K_c - \Delta K} \right\}^{1/2} \quad (2.3)$$

Dimana,

$da/dN$  = kecepatan perambatan retak

$\Delta K$  = perubahan *stress intensity factor*

K = harga kritis K

R = rasio tegangan =  $\sigma_{min}/\sigma_{max}$

C dan m = konstanta material

3. Kepecahan (*fracture*)

Menurut (Broek,1988) kepecahan dibagi menjadi dua antara lain:

- Cleavage* (terbelah), merupakan keretakan yang terjadi tanpa didahului deformasi plastis disebut juga dengan *brittle fracture*.
- Rupture* (runtuh), merupakan keretakan yang didahului deformasi plastis pada material.

Kepecahan terjadi apabila suatu struktur yang terdapat retak mengalami perambatan retak yang tidak stabil dan sangat cepat (*fast fracture*). *Fast fracture* terjadi pada *region III* dengan syarat  $K_I = K_{IC}$ .

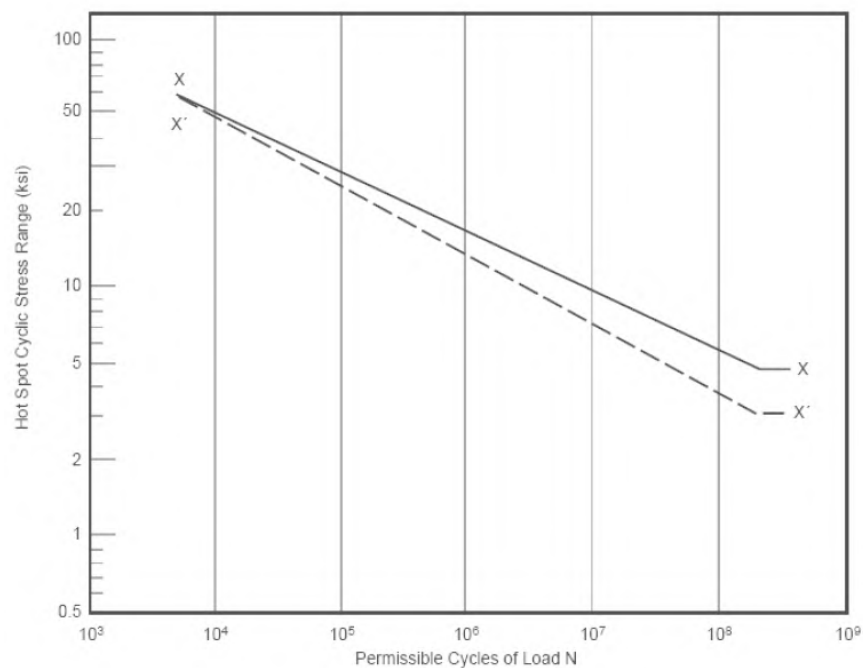
### 2.2.5 Analisis Kelelahan

Analisis kelelahan berfungsi untuk mengetahui umur kelelahan pada tiap-tiap joint suatu struktur. Analisis kelelahan dengan pendekatan *cumulative damage* dapat

dilakukan dengan menggunakan 2 metode yaitu, metode deterministik dan spektral. Metode deterministik digunakan pada struktur yang terkena gelombang dengan periode yang panjang serta pada struktur yang tidak peka terhadap gaya dinamik. Sedangkan, metode spektral digunakan pada struktur yang terkena beban dinamik. Metode spektral menggunakan spektrum gelombang dan *transfer function*. Pada analisis kelelahan dalam tugas akhir ini, perhitungan *cumulative damage* menggunakan metode *spectral analysis* dengan menerapkan pendekatan yang disederhanakan (*simplified approach*). Karena dengan pendekatan ini perancang tidak perlu menyelesaikan analisis kelelahan dengan prosedur panjang seperti dengan analisis spektral penuh. Dalam analisis *fatigue*, terdapat parameter-parameter yang digunakan antara lain :

a. Kurva S-N

Kurva S-N menampilkan hubungan antara rentang tegangan (*stress range*) dengan jumlah siklus (N) untuk pembebanan yang menyebabkan kelelahan. Kurva S-N dibuat berdasarkan eksperimen yang telah dilakukan dengan menggunakan suatu spesimen baja yang diberi beban dengan nilai tertentu secara berulang-ulang dan dicatat jumlah N siklusnya hingga terjadi suatu kegagalan. Gambar 2.4 merupakan contoh kurva S-N menurut API - RP 2A WSD untuk *tubular joint*.



**Gambar 2.4** Kurva S-N (API RP 2 A WSD, 2000)

Kurva S-N ditampilkan dengan skala log-log. Tingkat akurasi penentuan kurva S-N dipengaruhi oleh parameter kemiringan (*slope*). Kurva S-N dapat dinyatakan dalam persamaan 2.4 matematis sebagai berikut:

$$N = 2 \times 10^6 \left( \frac{\Delta\sigma}{\Delta\sigma_{ref}} \right)^{-m} \quad (2.4)$$

Dimana:

$N$  = jumlah siklus beban sampai member mengalami *failure*.

$\Delta\sigma$  = rentang tegangan (tegangan maksimum – tegangan minimum).

$\Delta\sigma_{ref}$  = rentang pada siklus sebanyak  $2 \times 10^6$  *cycle*.

$m$  = kemiringan (*slope*) pada kurva S-N.

#### b. Aturan Palmgren-Miner

Perhitungan kelelahan sambungan pada struktur didasarkan pada hukum kegagalan kumulatif Palmgren-Miner yang dinyatakan pada persamaan 2.5 berikut ini :

$$D = \sum_{i=1}^N \frac{N_{applied_i}}{N_{resisted_i}} \quad (2.5)$$

Dimana :

$D$  = besar kerusakan dalam 1 tahun.

$N_{applied_i}$  = siklus pada rentang tegangan yang bekerja pada grup ke-i.

$N_{resisted_i}$  = siklus pada rentang tegangan yang diijinkan pada grup ke-i.

$N$  = jumlah pembagian grup rentang tegangan .

Kegagalan sambungan struktur akan terjadi apabila nilai persamaan Palmgren-Miner diatas lebih dari 1.

#### c. Stress Concentration Factor (SCF)

Bila sambungan *tubular* terkena gaya maka akan menimbulkan tegangan pada beberapa titik di sepanjang garis lasannya yang nilainya beberapa kali lipat lebih besar dari tegangan nominal. Pemusatan tegangan (*stress concentration*) menggambarkan suatu kondisi terjadinya tegangan lokal yang tinggi akibat geometri dari elemen strukturnya. Faktor pengali untuk mendapatkan tegangan maksimum dari tegangan nominal yang terjadi disebut *Stress Concentration Factor (SCF)*.

$$S = S_{nominal} \times SCF \quad (2.6)$$

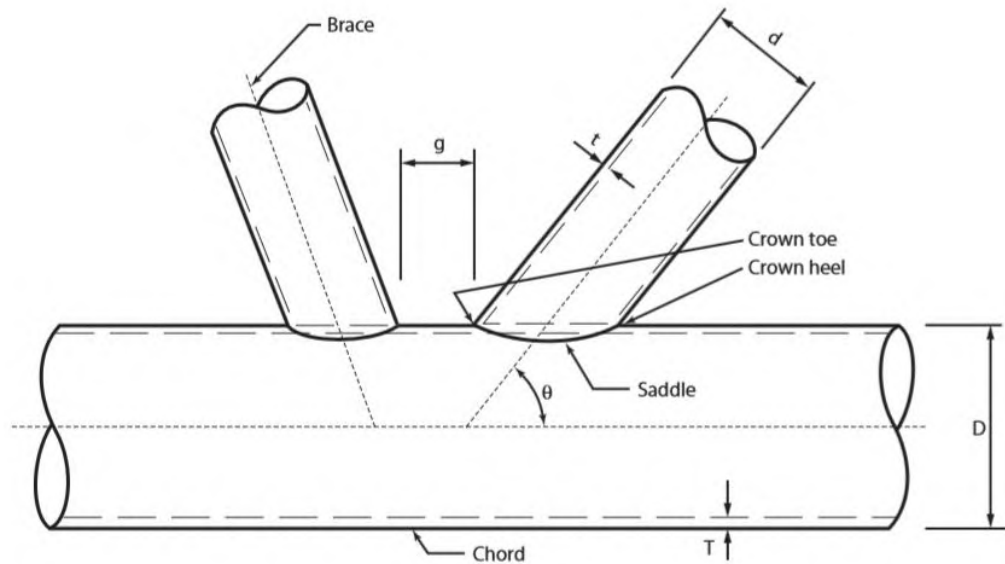
Dimana:

$S$  = tegangan maksimum

$S_{nominal}$  = tegangan nominal

$SCF$  = stress concentration factor

Nilai *Stress Concentration Factor* (SCF) besarnya akan berbeda-beda untuk setiap jenis geometri sambungan. Gambar 2.5 merupakan struktur geometris tubular untuk menentukan parameter-parameter SCF. Parameter-parameter yang berpengaruh pada penentuan SCF antara lain :



**Gambar 2.5** Struktur Geometris Tubular Member Tipe K (API RP 2A WSD,2000)

$$\alpha = 2L/D$$

$$\tau = t/T$$

$$\beta = d/D$$

$$\xi = g/D$$

$$\gamma = D/2T$$

$\theta$  = sudut antara *brace* dan *chord*

Dimana,

$D$  = diameter luar *chord*

$d$  = diameter luar *brace*

$T$  = ketebalan *chord*

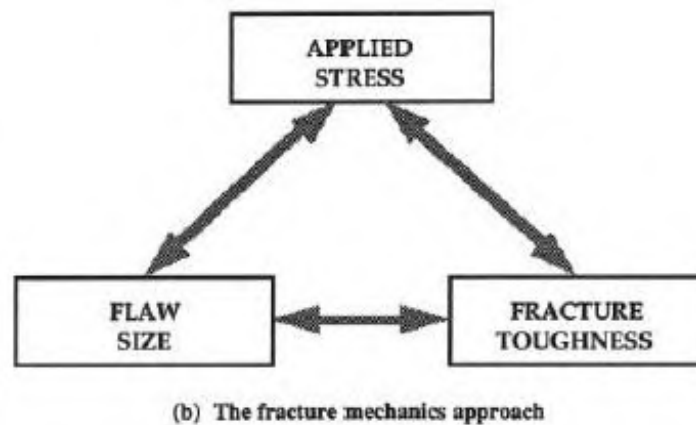
$L$  = panjang *chord*

$g$  = jarak antar ujung *brace*

$t$  = ketebalan *brace*

*Stress Concentration Factor* (SCF) menjadi indikasi atau menjadi ukuran kekuatan sambungan, khususnya kekuatan lelah sambungan. Untuk itu, akurasi perhitungan *Stress Concentration Factor* (SCF) untuk setiap geometri sambungan sangat penting karena dalam desain sambungan tubular pada struktur lepas pantai diinginkan umur lelah yang panjang.

### 2.2.6 Fracture Mechanics



Gambar 2.6 Faktor Penyebab Struktur Rentan (Syahroni,2015)

Gambar 2.6 menjelaskan mengapa faktor-faktor penyebab suatu struktur rentan terhadap kegagalan, antara lain :

#### 1. Flaw size (a)

Kegagalan struktur dapat terjadi akibat adanya berbagai macam diskontinuitas (*porosity, lack of fusion, to crack*, dan lain-lain). Diskontinuitas ini dapat terjadi mulai dari *crack* yang sangat kecil pada sambungan las hingga *crack* yang lebih besar. Inspeksi dan reparasi pada sambungan las dapat mengurangi ukuran *crack* dan jumlah *crack* yang terjadi pada struktur.

#### 2. Applied stress ( $\sigma$ )

Tegangan yang terjadi pada struktur yang berhubungan dengan fluktuasi tegangan, konsentrasi tegangan dan pembebanan. Tegangan ini dapat berubah sesuai dengan perubahan pembebanan dan desain struktur. Dengan adanya tegangan yang mengenai struktur, ukuran cacat (*flaw size*) dapat berubah hingga pada batas kritis yang menyebabkan kegagalan struktur.

### 3. *Fracture toughness* (K)

*Fracture toughness* merupakan sifat pada material yang memiliki *crack* untuk dapat bertahan dari kegagalan. Apabila suatu material memiliki *fracture toughness* yang tinggi maka material tersebut akan mengalami *ductile fracture*.

*Fracture mechanics* merupakan metode untuk menentukan perilaku kepecahan pada suatu struktur menggunakan parameter-parameter seperti tegangan (*stress*) dan ukuran retak (*crack size*). Pada struktur yang kompleks seperti jembatan, kapal, pesawat terbang dan *pressure vessel* dapat mengalami berbagai macam diskontinuitas. Dengan *fracture mechanics* seorang *engineer* dapat menentukan *allowable stress* dan inspeksi yang dibutuhkan pada struktur. Fungsi lain dari *fracture mechanics* ialah mengetahui nilai pertumbuhan retak awal hingga mencapai batas kritis dan dapat memperkirakan umur kelelahan guna memperpanjang umur struktur. *Fracture mechanics* menggunakan retak awal sebagai salah satu parameter untuk menganalisis umur kelelahan. Retak awal ini apabila terkena beban siklis maka akan merambat dan terjadi perubahan ukuran retak. Bila ukuran retak telah mencapai batas kritis maka dapat mengakibatkan kegagalan struktur. Ada 2 metode yang digunakan dalam *fracture mechanics* yaitu *Linear Elastic Fracture Mechanics (LEFM)* dan *Elastic Plastic Fracture Mechanics (EPFM)*.

#### 2.2.6.1 *Linear Elastic Fracture Mechanics*

*Linear elastic fracture mechanics* merupakan metode yang menunjukkan hubungan antara medan tegangan dengan distribusinya di sekitar ujung retak berdasarkan ukuran, bentuk, orientasi retak dan material properti akibat tegangan nominal yang dikenakan pada struktur (Barsom & Rolfe, 1977). Metode ini digunakan pada material yang menerima beban siklis yang relatif kecil (tidak melewati *yield strength*). LEFM dapat digunakan selama daerah plastis sangat kecil dimana tegangan lebih rendah daripada tegangan ijin material ( $\sigma < 0,8 \sigma_{ys}$ ) (Broek, 1988). LEFM umumnya digunakan untuk material yang bersifat *brittle* seperti keramik, kaca, atau baja berkekuatan tinggi, dimana daerah plastis sangat kecil karena tegangan lebih rendah daripada tegangan ijin.

#### 2.2.6.2 Elastic plastic fracture mechanics (EPFM)

Pada metode *elastic plastic fracture mechanics (EPFM)* material diasumsikan menerima beban yang sangat besar hingga melewati *yield strength* dari material tersebut. Sehingga material tersebut tidak mampu kembali ke bentuk semula. Metode ini merupakan pengembangan analisis yang dapat menunjukkan deformasi plastis dari material. (Akbari,2005)

Metode *linear elastic analysis* kurang tepat digunakan pada struktur-struktur besar yang menggunakan baja berkekuatan rendah atau sedang misalnya material yang bersifat *ductile*, karena adanya zona plastis yang cukup besar di sekitar ujung retak, sehingga menyebabkan timbulnya perilaku elastis-plastis. Untuk itu dikembangkan metode *elastic plastic fracture mechanics* untuk menunjukkan karakteristik dari perilaku plastis material. Parameter yang sering digunakan pada EPFM adalah :

a. *J-R-curve analysis*

Prosedur yang digunakan untuk menentukan ketahanan struktur terhadap pertambahan retak yang konstan, disimbolkan dengan  $K_R$ .

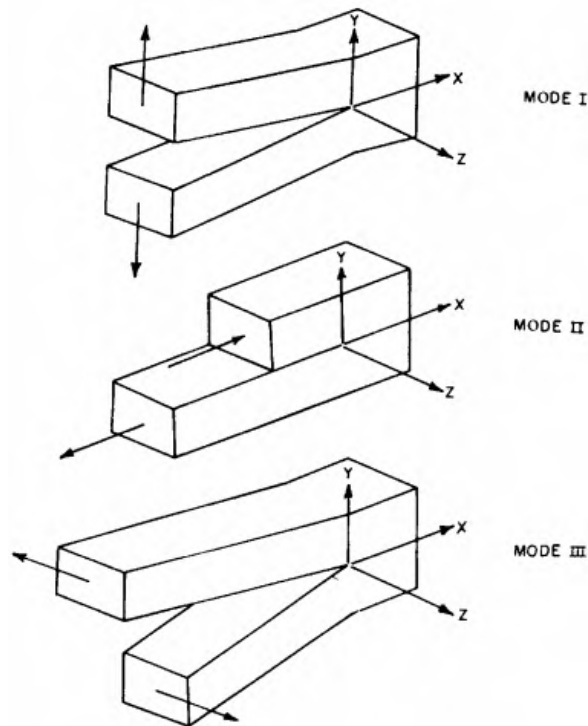
b. *Crack Tip Opening Displacement (CTOD)*

CTOD merupakan perhitungan perpindahan (deformasi) retak awal pada ujung retakan. CTOD bisa digunakan untuk menghitung retak yang melingkar maupun retak yang lancip.

c. *J-Integral*

Pengukuran medan tegangan dan regangan rata-rata yang terjadi di sekitar ujung retak pada perilaku elastis-plastis.

### 2.2.7 Mode Displasmen



**Gambar 2.7** Mode Displasmen pada Permukaan Retak (Barsom dan Rolfe,1987)

Setiap retak yang terkena tegangan akibat beban siklis maka retak tersebut akan mengalami displasmen. Displasmen ini terbagi menjadi tiga mode yang digambarkan pada Gambar 2.7, antara lain (Barsom & Rolfe,1977) :

1. Mode I (*Opening mode*), pada mode ini displasmen yang terjadi pada retak disebabkan oleh tegangan yang tegak lurus dengan arah perambatan retak.
2. Mode II (*Shear mode*), mode ini disebabkan oleh tegangan geser yang searah dengan perambatan retak.
3. Mode III (*Tearing mode*), pada mode ini displasmen retak disebabkan oleh tegangan geser yang berlawanan arah serta membentuk sudut dengan arah perambatan retak.

Pada penelitian tugas akhir ini, mode yang digunakan dalam analisis umur kelelahan ialah mode I (*opening mode*). Untuk menentukan tegangan dan displasmen pada retak (mode I) dapat dituliskan dengan persamaan irwin sebagai berikut :

$$\sigma_x = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[ 1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] \quad (2.7)$$

$$\sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[ 1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] \quad (2.8)$$



$$\sigma_z = \nu (\sigma_x + \sigma_y) = 0 \quad (2.9)$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \quad (2.10)$$

$$\tau_{xz} = \tau_{yz} = 0 \quad (2.11)$$

Dimana,

$K_I$  = *Stress Intensity Factor* untuk Mode I

$\sigma_x$  = tegangan normal (MPa)

$\tau_{xy}$  = tegangan geser bidang x arah sumbu y (MPa)

$r$  = jarak *cracktip* dengan *node* yang ditinjau (m)

$\theta$  = sudut antara *node* yang ditinjau dengan sumbu x (degree)

$\nu$  = *Poisson's Ratio*

### 2.2.8 *Stress Intensity Factor (SIF)*

*Stress intensity factor* merupakan perhitungan matematik yang berkaitan dengan beban dan ukuran cacat pada geometri tertentu. *Stress intensity factor (SIF)* digunakan untuk menganalisis medan tegangan didepan ujung retak. Prinsip dasar *fracture mechanics* ialah medan tegangan didepan ujung retak dari sebuah spesimen atau *member* struktur dapat dikarakteristikkan menggunakan satu parameter yaitu *stress intensity factor* ( $K_I$ ) (Barsom & Rolfe, 1999).

Persamaan 2.12 merupakan persamaan umum untuk *stress intensity factor* sebagai berikut :

$$K = \sigma_{nom} \sqrt{\pi a} f_{(g)} \quad (2.12)$$

Keterangan :

$K$  = *stress intensity factor* (ksi $\sqrt{\text{in}}$ )

$a$  = kedalaman retak awal

$\sigma_{nom}$  = tegangan nominal

$f_{(g)}$  = fungsi koreksi terhadap dimensi dan geometri serta posisi retak

Karena pada penelitian ini retak yang digunakan ialah semi-elliptical maka persamaan *stress intensity factor*nya ialah sebagai berikut :

$$K_I = 1,12 \sigma \sqrt{\pi \frac{a}{Q}} M_K \quad (2.13)$$

Dimana nilai Q dapat dicari menggunakan grafik sesuai Gambar 2.8, dengan menghubungkan nilai  $a/2c$  dan  $\sigma/\sigma_{ys}$ .

$$M_K = 1,0 + 1,2 \left( \frac{a}{t} - 0,5 \right) \quad (2.14)$$

Keterangan :

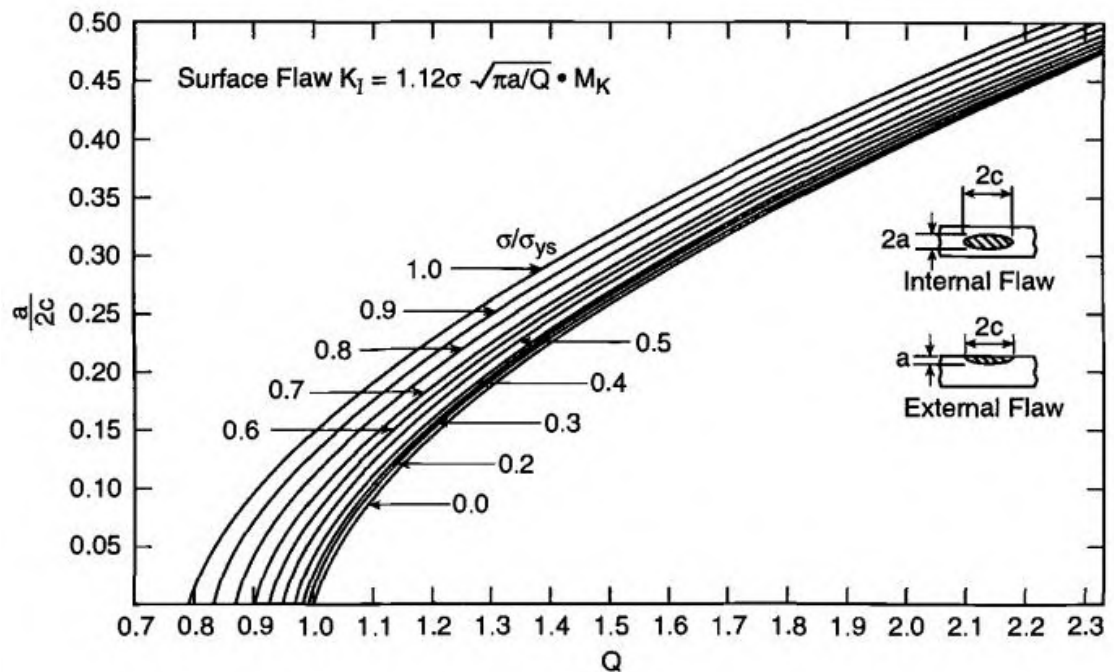
$K_I$  = Stress Intensity Factor

Q = Faktor koreksi *front free surface*

$M_K$  = Faktor koreksi *back free surface*

a = Kedalaman retak

t = Ketebalan material



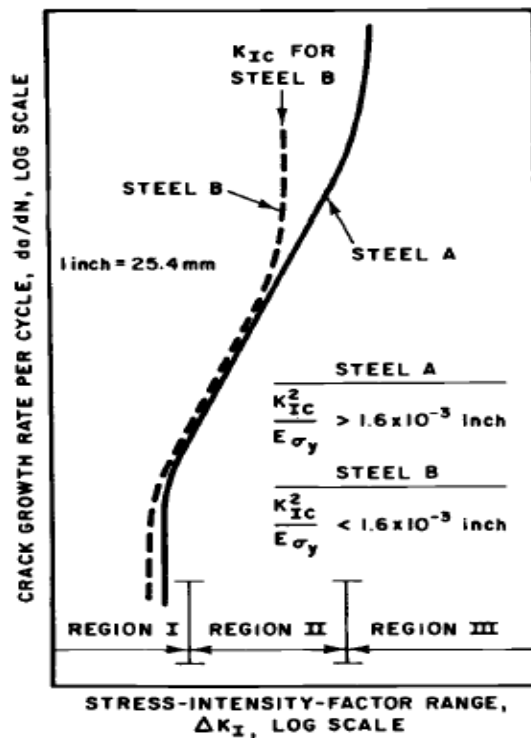
Gambar 2.8 Grafik Perbandingan  $a/2c$  dan  $\sigma/\sigma_{ys}$  (Barsom dan Rolfe, 1987)

## 2.2.9 Kecepatan Perambatan Retak

### 2.2.9.1 Umum

Kecepatan perambatan retak pada struktur dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain:

- Ketebalan struktur
- Beban yang mengenai struktur
- Tipe material
- Kondisi lingkungan, dan lain-lain.



Gambar 2.9 Perambatan Retak (Barsom,1977)

Dari *region II* pada Gambar 2.9 perambatan retak dapat diketahui dengan hukum paris-erdogan :

$$\frac{da}{dN} = C (\Delta K)^m \quad (2.15)$$

Keterangan :

a = kedalaman retak

N = jumlah *cycle*

C dan m= konstanta material

$\Delta K$  = perubahan *stress intensity factor*

Saat struktur terkena beban siklis maka kecepatan perambatan retak dapat dihitung dengan menggunakan parameter  $\Delta J$  (Anderson,2005).

$$\frac{da}{dN} = C \Delta J^m \quad (2.16)$$

Keterangan :

a = panjang retak

N = jumlah *cycle*

C dan m = konstanta material

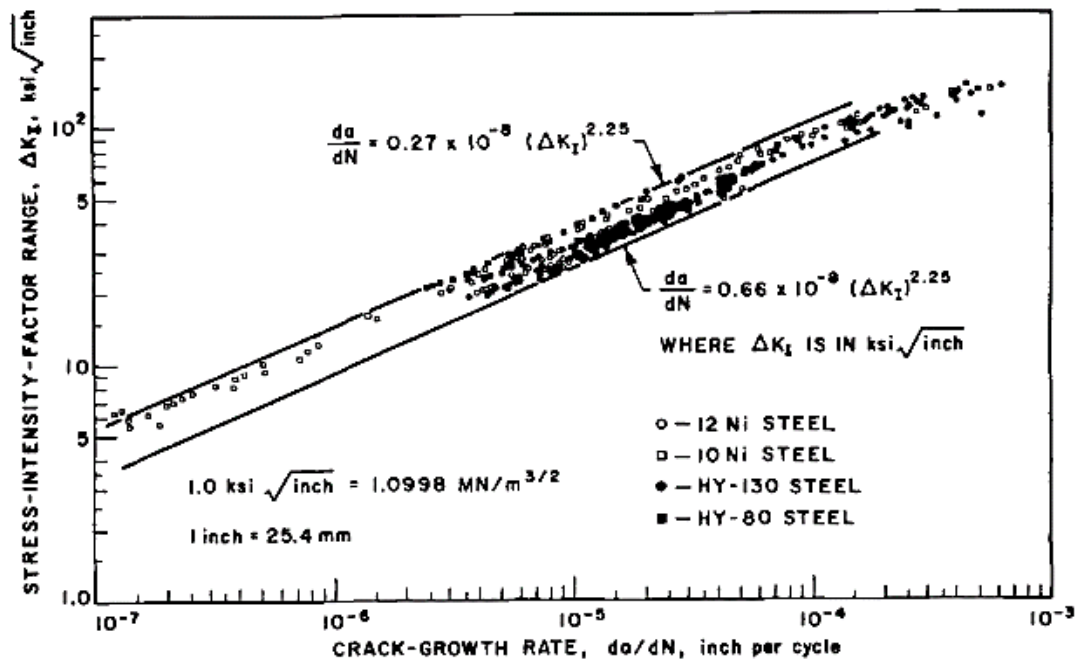
$$\Delta J = \frac{\Delta K_I^2}{E}$$

### 2.2.9.2 Perambatan Retak Berdasarkan Jenis Material

Menurut Barsom dan Rolfe (1987), terdapat 4 jenis material bila ditinjau dari perambatan retaknya. Perambatan ini bergantung pada jenis material dan nilai *yield strength*. Berikut jenis-jenis material yang dimaksud:

#### a. Martensitic Steel

Material yang termasuk dalam kategori *martensitic steel* adalah material dengan *yield strength* diatas 80 ksi. Gambar 2.10 merupakan laju perambatan *crack* pada material jenis *martensitic steel*:



Gambar 2.10 Laju Perambatan *Crack* pada *Martensitic Steel* (Barsom dan Rolfe,1987)

Laju perambatan *crack* dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$\frac{da}{dN} = 0,66 \times 10^{-8} (\Delta K_I)^{2,25} \quad (2.17)$$

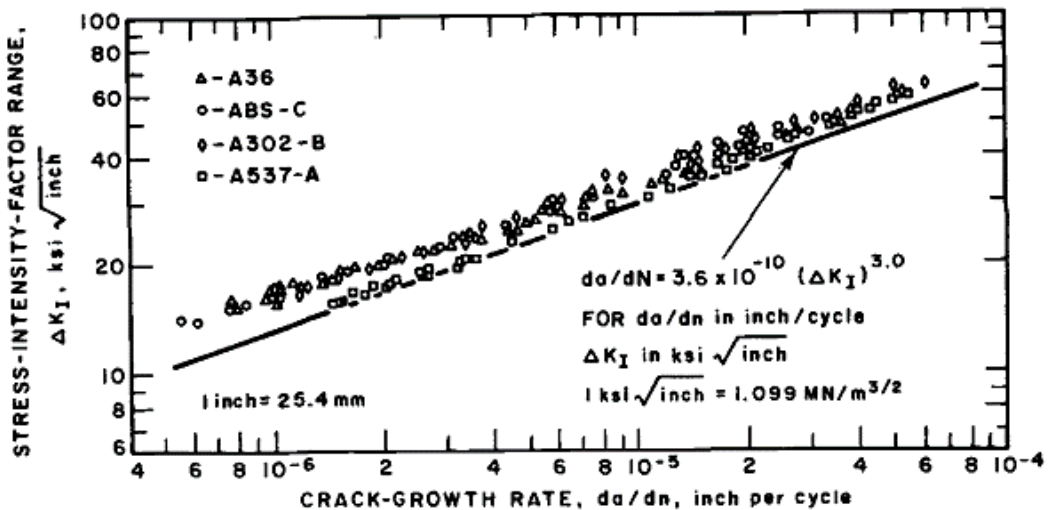
Dimana :

a = kedalaman retak (in)

$\Delta K$  = perubahan nilai SIF (ksi  $\sqrt{\text{in}}$ )

#### b. Ferrite-Pearlite Steel

Material untuk jenis *ferrite-pearlite steel* adalah material seperti A36, A302, ABS, dan A537. Gambar 2.11 merupakan grafik permbatan retak pada material ferrite pearlite :



Gambar 2.11 Laju Perambatan Retak untuk Material Ferrite-Perlite (Barsom dan Rolfe, 1987)

Perhitungan laju perambatan retaknya dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

$$\frac{da}{dN} = 3,6 \times 10^{-10} (\Delta K_I)^{3,0} \quad (2.18)$$

Dimana :

a = kedalaman retak (in)

$\Delta K$  = perubahan nilai SIF (ksi  $\sqrt{\text{in}}$ )

#### c. Austenitic Stainless Steel

Contoh material jenis ini adalah *stainless* A316, *stainless* A304 dan *stainless* A305.

Untuk formula perambatan retaknya dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

$$\frac{da}{dN} = 3,0 \times 10^{-10} (\Delta K_I)^{3,25} \quad (2.19)$$

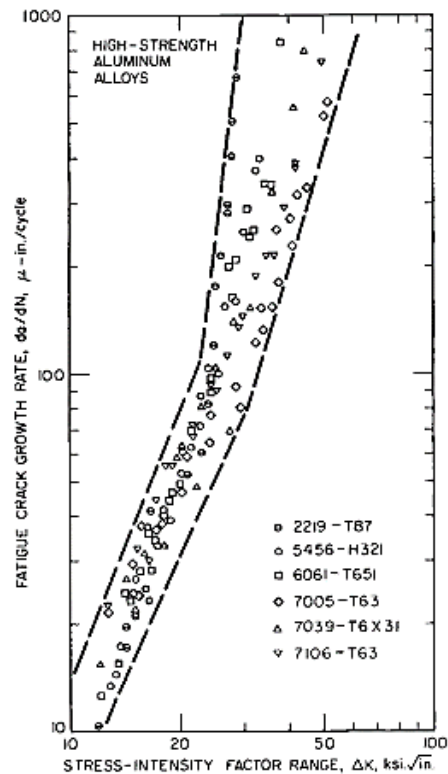
Dimana :

a = kedalaman retak (in)

$\Delta K$  = perubahan nilai SIF (ksi  $\sqrt{\text{in}}$ )

#### d. Campuran Titanium dan Aluminium

Merupakan material dengan ragam campuran, Gambar 2.12 merupakan grafik perambatan retak pada material campuran titanium dan aluminium:



**Gambar 2.12** Laju Perambatan Retak Material Aluminium and Titanium Alloy (Barsom dan Rolfe, 1987)

Laju perambatan retak dari material tipe ini bergantung pada komposisi dari campuran material yang digunakan.

#### 2.2.10 Analisis Umur Kelelahan *Fracture Mechanics*

Analisis umur kelelahan dengan metode *fracture mechanics* didapatkan dari mengintegrasikan hukum paris-erdogan tentang perambatan retak. Hasil dari integral hukum paris-erdogan sebagai berikut :

$$N = \int_{a_0}^{a_f} \frac{da}{C (\Delta K)^m} \quad (2.20)$$

Keterangan :

- $a_0$  = kedalaman retak awal (*initial crack*)
- $a_f$  = kedalaman retak akhir (*final crack*)
- $N$  = jumlah *cycle*
- $\Delta K$  = perubahan *stress intensity factor*
- $C$  dan  $m$  = konstanta material

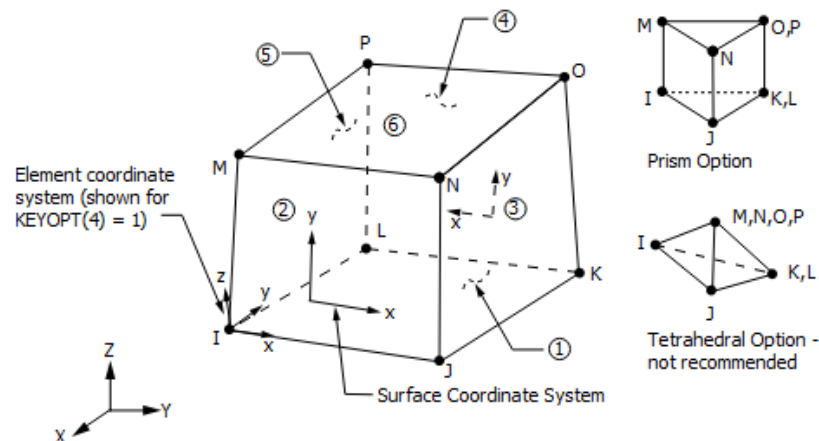
### 2.2.11 Metode Elemen Hingga

Metode elemen hingga merupakan prosedur numeris yang dapat digunakan untuk menyelesaikan masalah-masalah dalam bidang rekayasa seperti, analisa tegangan pada struktur, frekuensi dan *mode shape*, perpindahan panas, elektromagnetik, serta aliran fluida. Metode ini digunakan pada masalah-masalah yang tidak dapat diselesaikan dengan penyelesaian secara analitik. Konsep dasar dari metode elemen hingga adalah menyelesaikan suatu masalah dengan cara membagi suatu objek (spesimen) menjadi bagian-bagian kecil yang terhingga. Bagian-bagian kecil ini kemudian dianalisis dan hasilnya digabungkan kembali agar mendapatkan penyelesaian untuk keseluruhan objek (spesimen). Bagian-bagian kecil disebut dengan elemen dan tiap elemen dihubungkan dengan nodal (*node*).

Secara umum langkah-langkah dalam metode elemen hingga dapat diringkas sebagai berikut :

1. Membagi objek (spesimen) analisis menjadi elemen-elemen kecil.

Jenis elemen yang digunakan pada analisis tugas akhir ini adalah SOLID 45. Elemen SOLID 45 memiliki delapan *node* dengan masing-masing *node* memiliki tiga derajat kebebasan. Elemen ini memiliki kemampuan berdefleksi dan meregang secara besar karena memiliki sifat plastis. Elemen SOLID 45 dapat membentuk elemen dengan bentuk elemen prisma dan *tetrahedral*. Ilustrasi elemen SOLID 45 sesuai pada Gambar 2.13.



Gambar 2.13 Bentuk Elemen SOLID 45 (ANSYS 16.0)

## 2. Menentukan Fungsi Deformasi

Penentuan fungsi deformasi berkaitan dengan jumlah titik (*node*) dalam satu elemen serta *degree of freedom* (DOF) dari objek (spesimen) yang dimodelkan. Fungsi deformasi yang dipakai terdiri dari *polynomial linear*, kuadratik, *polynomial* kubik.

## 3. Menentukan persamaan hubungan antara regangan dan deformasi serta antara tegangan dengan regangan

Persamaan regangan dan deformasi dalam tiga arah sumbu x, y, dan z dapat dilihat dibawah ini :

$$\varepsilon_x = \frac{du}{dx} \quad (2.21)$$

$$\varepsilon_y = \frac{dv}{dy} \quad (2.22)$$

$$\varepsilon_z = \frac{dw}{dz} \quad (2.23)$$

Sedangkan, persamaan antara tegangan dengan regangan dapat dilihat dibawah ini :

$$\sigma_x = E \varepsilon_x \quad (2.24)$$

$$\sigma_y = E \varepsilon_y \quad (2.25)$$

$$\sigma_z = E \varepsilon_z \quad (2.26)$$

## 4. Menentukan Matrik Persamaan dan Kekakuan Elemen

Ada tiga metode dalam penentuan persamaan Ada tiga metode dalam penentuan persamaan kekakuan elemen:

### a. Metode Keseimbangan Langsung (*Direct Equilibrium Method*)

Matrik persamaan elemen yang menunjukkan hubungan antara gaya, kekakuan dan deformasi pada elemen ditentukan berdasarkan prinsip keseimbangan gaya.

### b. Metode Kerja atau Energi (*Work or Energy Method*)

Metode ini dilakukan dengan pendekatan yang mencakup komponen material, dimensi, beban, dan syarat batas dari suatu objek (spesimen).

### c. Metode dengan Pemberatan pada Energi Sisa (*Methods of Weighted Residual*)

Disebut juga dengan metode galerkin, metode ini menggunakan persamaan diferensial dan digunakan saat metode energi tidak dapat menyelesaikan permasalahan.



Persamaan elemen yang dihasilkan secara umum adalah sebagai berikut :

$$\{f\} = [k] \{d\} \quad (2.27)$$

Dimana :

$\{f\}$  = matriks gaya elemen

$[k]$  = matriks kekakuan elemen

$\{d\}$  = matriks deformasi

#### 5. Penggabungan Persamaan Elemen Menjadi Persamaan Global

Penggabungan persamaan elemen dilakukan dengan prinsip superposisi dengan menggunakan prinsip kontinuitas dan kompatibilitas. Prinsip kontinuitas yaitu tiap elemen saling berhubungan sehingga dapat menyalurkan beban berupa tegangan ke elemen disekitarnya. Sedangkan, prinsip kompatibilitas yaitu tiap elemen memiliki titik (*node*) dengan jumlah dan sifat *degree of freedom* (DOF) tertentu. Persamaan global secara umum ditampilkan pada persamaan 2.28 di bawah ini :

$$\{F\} = [K] \{d\} \quad (2.28)$$

Dimana :

$\{F\}$  = matriks gaya global

$[K]$  = matriks kekakuan global

$\{d\}$  = matriks deformasi

#### 6. Menyelesaikan Persamaan Derajat Kebebasan yang belum diketahui

Pada tahap ini, harga dari besaran yang tidak diketahui pada matriks kekakuan global dapat diperoleh dengan menggunakan metodel eliminasi dan iterasi.

#### 7. Penyelesaian Regangan dan Tegangan Elemen

Hasil yang didapatkan digunakan untuk menentukan kualitas dan desain objek (spesimen) yang dilakukan.

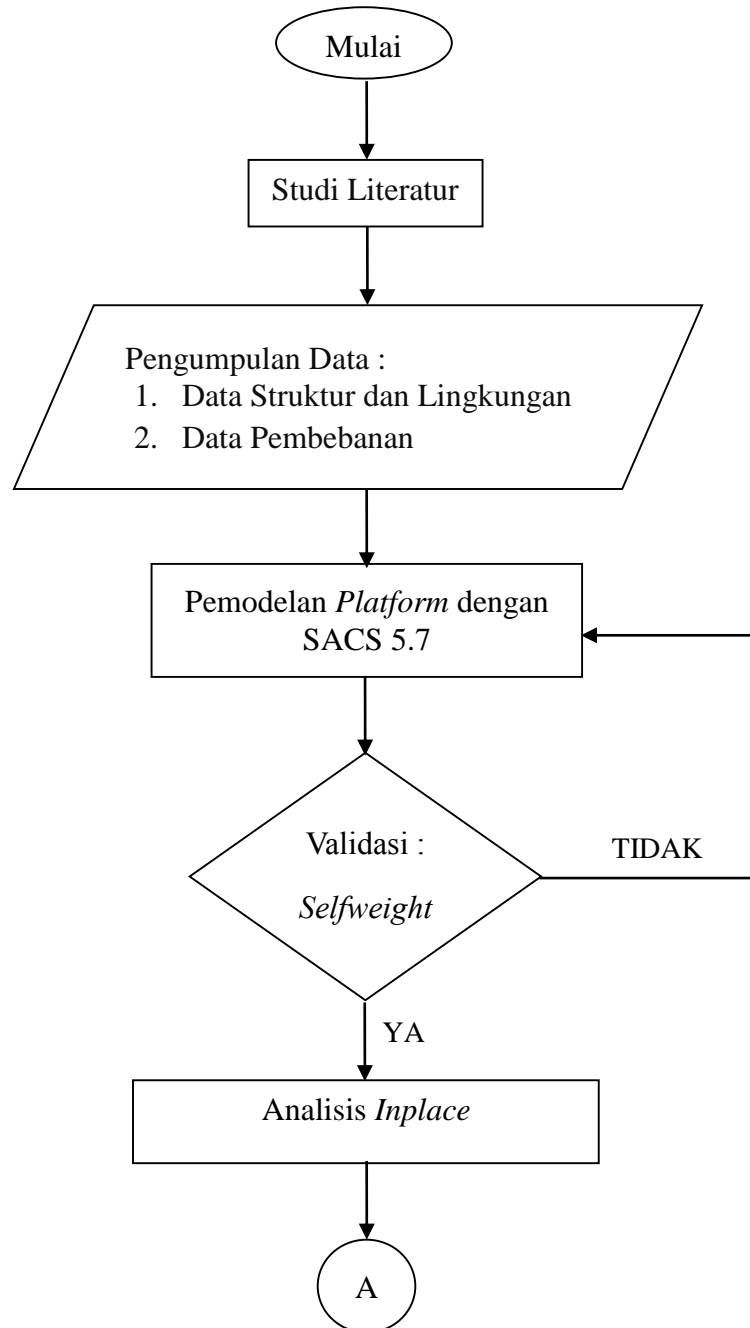
#### 8. Interpretasi Hasil

Hasil yang didapatkan berupa deformasi, tegangan, dan regangan sebagai acuan dlama menilai desain yang dimodelkan. Pada tahap ini dilakukan analisa pada bagian struktur yang paling rentan menerima beban.

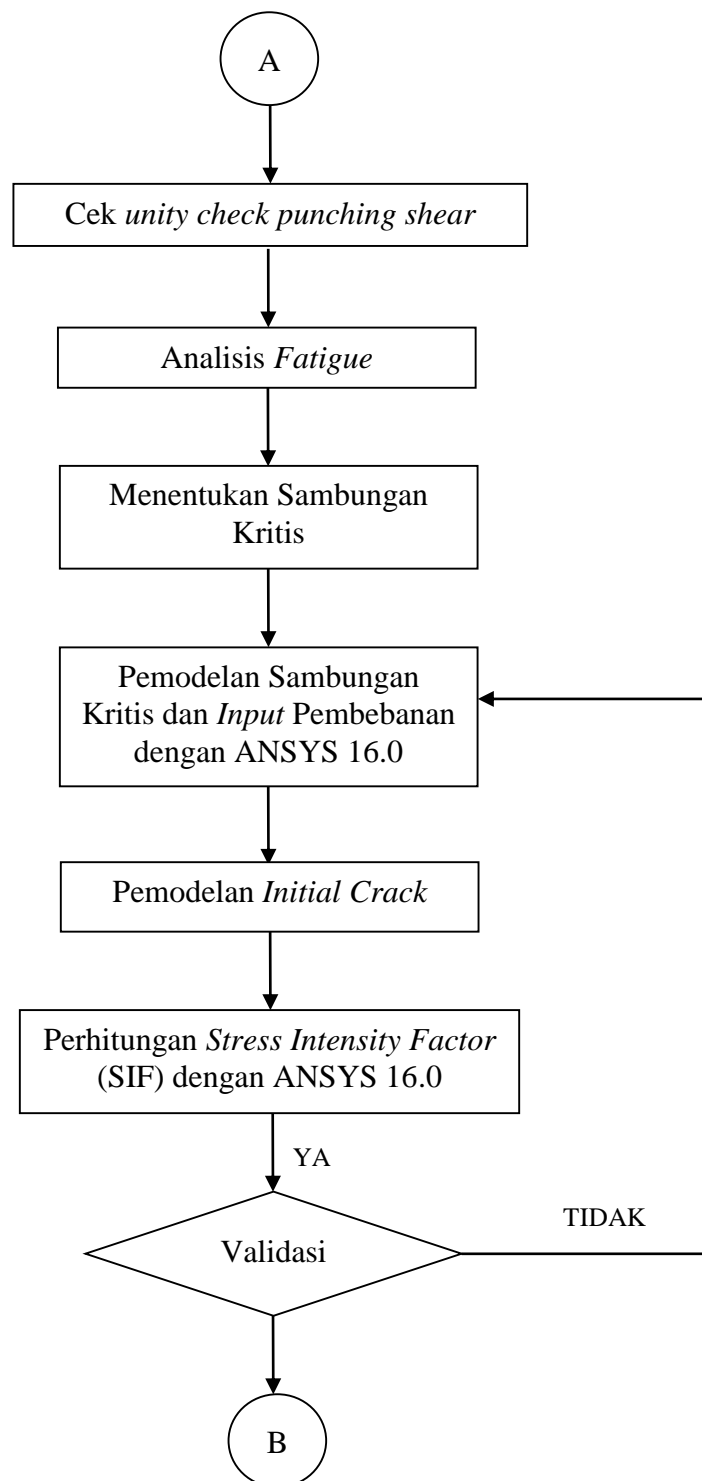
## BAB 3

### METODOLOGI PENELITIAN

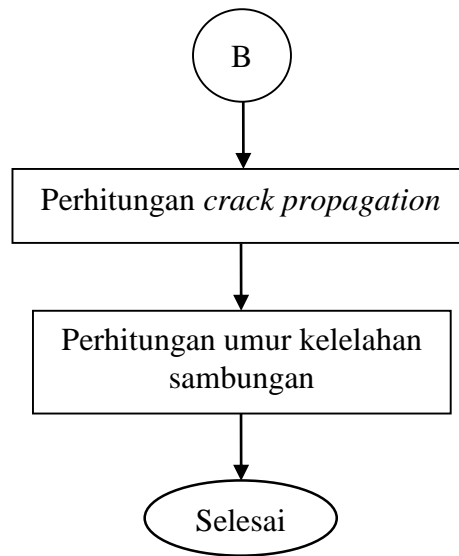
#### 3.1 Diagram Alir Analisis Umur Kelelahan



**Gambar 3.1** Diagram Alir Analisis Umur Kelelahan



**Gambar 3.1** Diagram Alir Analisis Umur Kelelahan (lanjutan)



**Gambar 3.1** Diagram Alir Analisis Umur Kelelahan (lanjutan)

Diagram alir pada Gambar 3.1 dibuat agar pada pengerjaan tugas akhir sesuai dengan jalur yang telah dibuat. Adapun rincian dari diagram alir diatas sebagai berikut :

1. Studi Literatur

Studi dan pengumpulan literatur sebagai bahan referensi dan teori – teori yang berkaitan dan diperlukan dalam penyelesaian tugas akhir ini. Studi literatur ini juga bertujuan untuk mendapatkan informasi dari penelitian yang telah dikerjakan sebelumnya.

2. Pengumpulan Data

Pengumpulan data diperlukan untuk mengetahui studi kasus yang dapat diambil dari data tersebut. Data yang diperlukan dalam tugas akhir ini meliputi data struktur, data lingkungan dan pembebanan pada struktur.

3. Pemodelan *Platform* dengan bantuan SACS 5.7

Pemodelan dilakukan untuk mengetahui gambaran umum mengenai *platform* yang akan dianalisis umur kelelahannya. Pemodelan global ini memerlukan data-data pendukung seperti data gelombang, data tanah, data arus, data angin, dan lain-lain.

#### 4. Validasi Struktur

Validasi dilakukan untuk mengetahui apakah stuktur yang dimodelkan dengan struktur sesungguhnya sudah memenuhi kesamaan atau tidak. Dalam penelitian ini validasi dilakukan dengan 2 cara, yaitu menggunakan berat struktur model dengan struktur sesungguhnya serta membandingkan titik berat yang didapatkan dari report dan pemodelan SACS.

#### 5. Analisis *Inplace*

Analisis *Inplace* merupakan suatu analisis yang dilakukan untuk memastikan dan menentukan kondisi dari setiap *member* (*chord* dan *brace*) pada setiap pembebanan yang diterima dilokasi struktur tersebut diinstal.

#### 6. Cek *Unity Check* dan *Punching Shear Ratio*

Mengecek *unity check ratio* merupakan langkah yang dilakukan untuk menentukan kondisi *joint* pada *platform* dengan nilai UC tertinggi.

#### 7. Analisis *Fatigue*

Analisis *fatigue* bertujuan untuk mengetahui nilai *service life* pada tiap-tiap *joint platform* Attaka B. Analisis *fatigue* dibagi menjadi 2 cara yaitu : *cumulative damage* dan *fracture mechanics*. *Cumulative damage* dapat dilakukan dengan bantuan SACS maupun perhitungan manual.

#### 8. Penentuan Sambungan Kritis

Sambungan kritis ditentukan dari hasil analisis *fatigue* menggunakan *cumulative damage* dengan *service life* terendah.

#### 9. Pemodelan Sambungan Kritis

Pemodelan sambungan kritis dilakukan dengan menggunakan *software solidwork*. Pemodelan dilakukan sedemikian rupa hingga menyerupai bentuk sesungguhnya.

#### 10. Pemodelan *Initial Crack*

*Intial Crack* pada sambungan kritis dilakukan dengan mengasumsikan retak awal sebesar 0,75 mm. Pemodelan dilakukan menggunakan bantuan *software ANSYS* dan diletakkan didekat *hot spot stress*.

11. Menghitung *Stress Intensity Factor*

*Stress Intensity Factor (SIF)* dihitung secara manual maupun dengan *software ANSYS 16.0* pada daerah retak. Setelah hasilnya didapatkan maka selanjutnya kedua hasil tersebut dibandingkan.

12. Validasi *Stress Intensity Factor*

Validasi dilakukan pada perhitungan *stress intensity factor (SIF)* secara manual maupun dengan *software ANSYS 16.0*. Apabila hasil validasi tidak sesuai maka dilakukan pemodelan sambungan kritis dan retak awal kembali.

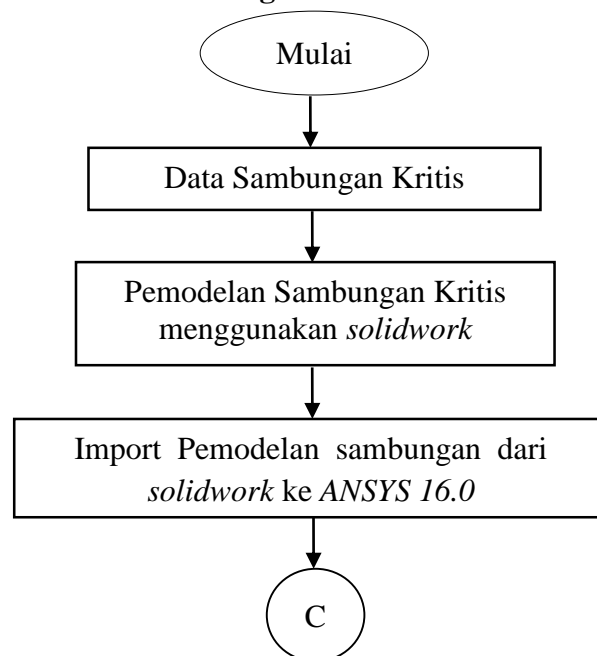
13. Perhitungan *Crack Propagation*

Menghitung besarnya nilai perambatan retak pada sambungan dengan menggunakan diagram Paris (Hukum Paris-Erdogan) untuk mengetahui kecepatan perambatan setiap siklusnya.

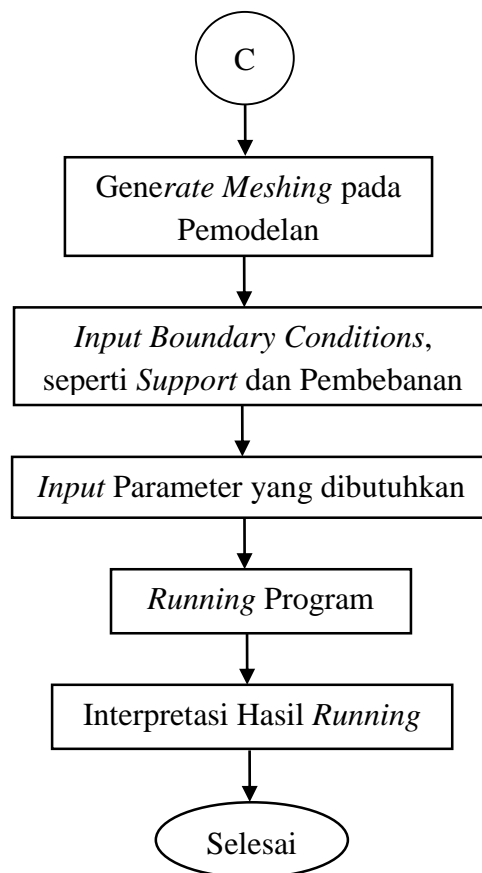
14. Perhitungan Umur Kelelahan pada Sambungan

Perhitungan dilakukan pada sambungan kritis akibat kelelahan. Perhitungan ini menggunakan persamaan kecepatan perambatan pada *region II* yang telah diintegrasikan.

**3.2 Diagram Alir Pemodelan Sambungan Kritis**



**Gambar 3.2** Diagram Alir Pemodelan Sambungan Kritis



**Gambar 3.2** Diagram Alir Pemodelan Sambungan Kritis (lanjutan)

Seperti yang sudah dijelaskan pada gambar 3.2, pemodelan sambungan kritis dilakukan pada *software solidwork* serta *software ANSYS 16.0*. Pemodelan sambungan kritis pada *software solidwork* dilakukan untuk mendapatkan visualiasi dari sambungan kritis yang akan dianalisis. Sedangkan, *software ANSYS 16.0* membantu untuk memasukan parameter pembebanan, memodelkan retak serta mendapatkan nilai yang diperlukan seperti *stress intensity factor* (SIF) maupun displasmen yang terjadi. Berikut merupakan gambaran singkat dari diagram alir diatas :

1. Pemodelan sambungan kritis dilakukan dengan membuat geometri sambungan *tubular* yang ditinjau dengan *software solidwork*.
2. Setelah pemodelan geometri sambungan selesai, pemodelan diimport ke *software ANSYS 16.0*

3. Setelah model selesai diimport, *meshing* pada model dimana *meshing* pada sekitar area retak lebih halus dari pada area yang lain agar diperoleh hasil yang lebih akurat.
4. Kemudian pemberian *boundary conditions*, seperti *support* dan pembebanan sesuai dengan hasil *running inplace punching shear* yang diperoleh dengan menggunakan *software SACS 5.7*.
5. Diinputkan material dan properti dari sambungan *tubular*. Untuk material diberikan *input Modulus Young (E)*, *Shear Modulus (G)*, *Mass Density Damping* dan lain-lain sesuai dengan data material dari sambungan *tubular* yang ditinjau.
6. Setelah langkah di atas selesai maka analisis siap dilakukan. Analisis ini bertujuan untuk mendapatkan tegangan kritis yang terjadi pada model *tubular joint* yang memiliki retak serta mendapatkan nilai SIF yang kemudian digunakan untuk menentukan umur kelelahan struktur.

### 3.3 Data Pendukung

Data yang digunakan dalam penelitian tugas akhir ini merupakan data *platform* Attaka B dengan rincian sebagai berikut :

#### 3.3.1 Profil *platform*

Berikut merupakan profil *platform* yang menjadi studi kasus penelitian ini :

Nama <i>platform</i>	: Attaka B
Pemilik	: Chevron Indonesia Company
Lokasi	: Attaka <i>field</i> , blok mahakam
Kedalaman operasi	: 188 ft
Jumlah barge bumpers	: 3
Jumlah <i>deck</i>	: 2
Jumlah riser	: 11
Jumlah konduktor	: 24
Boat landing	: 1
Jumlah kaki	: 6
Jenis material	: ASTM 35 untuk <i>tubular</i> dengan diameter <16” ASTM 36 untuk <i>tubular</i> dengan diameter >16”



*Yield stress material* : 35 ksi untuk *tubular* dengan diameter <16”  
 36 ksi untuk *tubular* dengan diameter >16”

Orientasi *platform* : -40° arah timur dari arah kutub utara

### 3.3.2 Data Lingkungan

#### 3.3.2.1 Data Kedalaman

Tabel 3.1 menjelaskan *platform* Attaka B beroperasi dengan kedalaman sebagai berikut :

**Tabel 3.1** Data Kedalaman *Platform*

<i>Description</i>	<i>5 years</i>		<i>100 years</i>	
	<i>Minimum water depth</i>	<i>Maximum water depth</i>	<i>Minimum water depth</i>	<i>Maximum water depth</i>
<i>Seabed from SWL (ft)</i>	188	188	188	188
<i>½ Highest astronomical tide (ft)</i>	(-) 4,1	(+) 4,1	(-) 4,1	(+) 4,1
<i>Storm surge (ft)</i>	-	-	1,6	1,6
<i>Water depth (ft)</i>	183,9	192,1	185,5	193,7

#### 3.3.2.2 Data Angin

Beban angin dihitung sesuai dengan ketentuan API-RP-2A WSD. Berikut merupakan Tabel 3.2 kecepatan angin yang digunakan dalam platfrom Attaka B :

**Tabel 3.2** Data Angin

<i>Return period</i>	<i>Wind speed (mph / fps)</i>	<i>Condition</i>
<i>5-years</i>	32,6 / 47,81	<i>1-minute average</i>
<i>Return period</i>	<i>Wind speed (mph / fps)</i>	<i>Condition</i>
<i>100-years</i>	39,0 / 57,20	<i>1-minute average</i>

### 3.3.2.3 Data Gelombang

Berikut merupakan Tabel 3.3 ketinggian dan periode gelombang yang mengenai *platform* Attaka B :

**Tabel 3.3** Data Gelombang

<i>Return period</i>	<i>Wave period (sec)</i>
<i>5-years</i>	7,70

Tabel 3.4 berikut merupakan data persebaran gelombang yang mengenai platform Attaka B (dalam satuan juta) :

**Tabel 3.4** Persebaran Gelombang

<i>Significant wave height (m)</i>	<i>Direction</i>								Total
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	
0,00 - 0,25	-	9,8	12,5	22,5	18,2	12,6	-	-	78,6
0,25 – 0,50	-	26,7	35,9	74,6	53,3	35,9	-	-	226,5
0,50 – 0,75	-	29,9	42,7	93,9	67,0	42,7	-	-	276,2
0,75 – 1,00	-	20,4	32,6	78,4	56,0	32,6	-	-	220,0
1,00 – 1,25	-	9,4	17,4	47,3	33,8	17,4	-	-	125,2
1,25 – 1,50	-	2,9	6,6	21,1	15,1	6,6	-	-	52,4
1,50 – 1,75	-	0,8	1,8	7,1	5,0	1,8	-	-	16,4
1,75 – 2,00	-	0,1	0,4	1,8	1,3	0,4	-	-	3,9
2,00 – 2,25	-	-	0,1	0,3	0,2	0,1	-	-	0,7
2,25 – 2,50	-	-	-	-	0,1	-	-	-	0,1
Total	-	100,0	150,0	350,0	250,0	150,0	-	-	1000,0

### 3.3.2.4 Profil Arus

Komponen yang membentuk kecepatan arus ialah arus pasang surut (*tidal flow current*) dan kecepatan hembusan angin (*wind driven current*). Kecepatan arus hanya digunakan saat analisis *inplace platform*. Data profil arus Attaka B dijelaskan pada Tabel 3.5 dibawah ini :

**Tabel 3.5** Profil Arus

<i>Depth (percentage % from mudline)</i>	<i>Tidal flow current (ft/sec)</i>		<i>Wind driven current (ft/sec)</i>		<i>Total current (ft/sec)</i>	
	<i>5 years</i>	<i>100 years</i>	<i>5 years</i>	<i>100 years</i>	<i>5 years</i>	<i>100 years</i>
100%	1,49	1,76	0,45	0,54	1,94	2,30
90%	1,47	1,73	0,33	0,20	1,80	1,93
80%	1,44	1,70	0,21	0,12	1,65	1,82
70%	1,42	1,67	0,09	0,07	1,51	1,74
60%	1,39	1,64	0,06	0	1,45	1,64
50%	1,35	1,59	0	0	1,35	1,59
40%	1,31	1,54	0	0	1,31	1,54
30%	1,25	1,48	0	0	1,225	1,48
20%	1,18	1,4	0	0	1,18	1,40
10%	1,07	1,27	0	0	1,07	1,27
0%	0	0	0	0	0	0

### 3.3.2.5 Beban topside

Beban *topside* yang bekerja pada *platform* Attaka B terdiri dari *selfweight deck*, berat *plate*, berat *grating*, berat *equipment*, *live loads*, dan berat *piping*. Tabel 3.6 berikut merupakan detail dari beban *topside* :

**Tabel 3.6** Beban Topside

<i>Description</i>	<i>Loads</i>
<i>Deck crane - axial load</i>	25,66 kips
<i>Deck crane – maximum moment</i>	384,9 ft-kip
<i>Work over rig</i>	1335 kips
<i>Cellar deck piping</i>	40,0 lb/ft <sup>2</sup>
<i>Main deck piping</i>	25,0 lb/ft <sup>2</sup>
<i>Description</i>	<i>Loads</i>
<i>Deck plating</i>	16,0 lb/ft <sup>2</sup>
<i>Deck grating</i>	8,0 lb/ft <sup>2</sup>
<i>Deck firewall</i>	0,42 kip/ft

### 3.3.3 Data Tanah

Tabel 3.7 merupakan data kapasitas *pile* atau beban yang ditumpu oleh masing-masing kaki *jacket*.

**Tabel 3.7 Data Kapasitas Pile**

<i>Pilehead / penetration</i>	<i>Ultimate Compressive Pile Axial Capacity (kips)</i>
101L / 287,3 ft	3186,9
109 L / 289,0 ft	3273,8
119L / 287,3 ft	3186,9
181L / 287,3 ft	3186,9
189L / 289,0 ft	3273,8
199L / 287,3 ft	3186,9

### 3.3.4 Marine growth

Tabel 3.8 di bawah merupakan data *marine growth* :

**Tabel 3.8 Data Marine growth**

<i>Elevation (-) ft</i>	<i>Average Radial Hard Growth (in)</i>
Max storm WD to EL (-) 50	3
El (-) 50 to El (-) 100	2
El (-) 100 to El (-) 160	1,25
El (-) 160 to El (-) 188	1

### 3.3.5 Splash zone

*Splash zone* pada *platform* Attaka B terjadi pada kedalaman (-) 10 ft di bawah MSL hingga (+) 10 ft di atas MSL.

### 3.3.6 Material

Material yang digunakan pada *platform* Attaka B ialah material tipe ASTM A35 untuk *tubular* dengan diameter < 16 in dan tipe ASTM A36 untuk *tubular* dengan diameter  $\geq$  16 in.

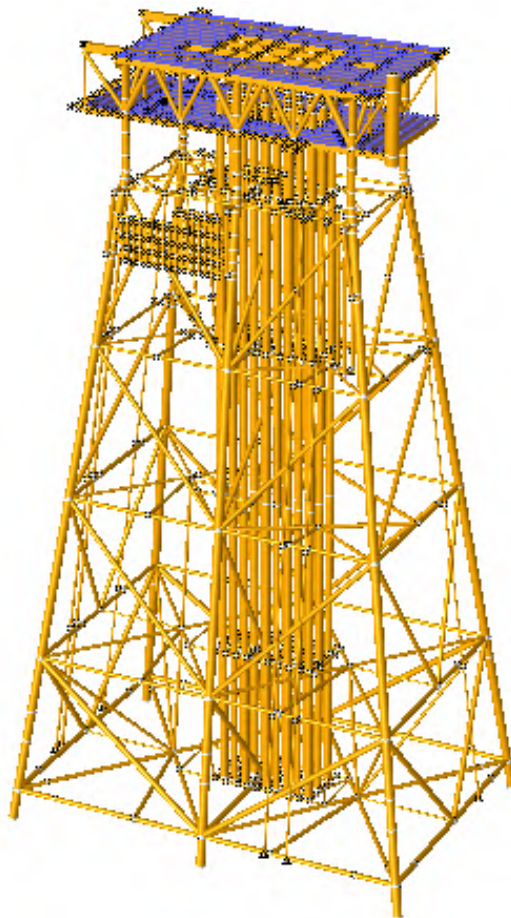
(Halaman ini sengaja dikosongkan)

## BAB 4

### HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 4.1 Pemodelan Global *Platform* Attaka B

Pemodelan struktur Attaka B dalam tugas akhir ini dimodelkan menggunakan *software* SACS 5.7. Pemodelan didasarkan pada profil *platform*, data kedalaman, data arus, data angin, data gelombang, data tanah, *marine growth*, *splash zone*, data material, dan beban *topside* yang sudah dijelaskan pada bab 3 diatas. Gambar 4.1 merupakan pemodelan global *platform* attaka B :



**Gambar 4.1** Pemodelan Global *Platform* Attaka B

##### 4.1.1 Validasi *Selfweight*

Validasi bertujuan untuk mengetahui apakah pemodelan struktur sudah sesuai dengan struktur asli yang berada di lapangan. Validasi ini dilakukan dengan cara membandingkan *selfweight* pemodelan dengan struktur asli. *Selfweight* struktur asli

didapatkan dari *report* yang telah dibuat oleh perusahaan pemilik struktur. Persentase perbandingan (nilai error) ini tidak boleh lebih dari 5% agar model struktur sesuai dengan struktur asli. Tabel 4.1 merupakan tabel perbandingan antara *selfweight* pemodelan dengan struktur asli :

**Tabel 4.1** Validasi *Selfweight*

	<i>Selfweight</i> (Kips)	Nilai <i>Error</i> (%)
Pemodelan	3884,96	0,003
<i>Report</i>	3885,08	

#### 4.1.2 Validasi *Center of gravity* (COG)

Seperti pada validasi *selfweight*, validasi *center of gravity* memiliki tujuan yang sama. Validasi *center of gravity* (COG) dilakukan dengan menggunakan *center of gravity* dari pemodelan SACS dan juga dari *report* yang telah dibuat oleh perusahaan. Tabel persentase validasi *center of gravity* (COG) dapat dilihat pada Tabel 4.2 di bawah ini.

**Tabel 4.2** Validasi COG

COG	Model	<i>Report</i>	Persentase <i>Error</i> (%)
arah x (ft)	0,5	0,509	1,8
arah y (ft)	-0,052	-0,05	3,84
arah z (ft)	-49,786	-49,912	0,41

#### 4.2 Analisis *Inplace*

Merupakan suatu analisis yang dilakukan untuk mengetahui kondisi tiap *member* yang menerima pembebanan dari tiap kondisi lingkungan dimana *platform* tersebut diinstal. Analisis *inplace platform* Attaka B dilakukan menggunakan bantuan *software* SACS 5.7. Salah satu cara untuk mengetahui kondisi *member* maupun *joint* pada *platform* Attaka B ialah dengan melihat *unity check* (UC) dari hasil analisis *inplace* yang telah dilakukan. Apabila *unity check* (UC) melebihi angka 1 maka dapat dikatakan *member* mengalami kelebihan beban. Tabel 4.3 merupakan hasil analisis *inplace platform* Attaka B :

**Tabel 4.3** *Joint Can Summary*

<i>Joint</i>	Diameter (IN)	<i>Thickness Yield</i> (IN)	<i>Stress</i> (KSI)	UC
323	14	0,375	36	1,036
481L	34	0,8	36	0,944
489L	34	0,8	36	0,835
605	10,75	0,365	35	0,834
686	10,75	0,365	35	0,753
336	18	0,375	36	0,717
401	12,75	0,375	35	0,716
678	10,75	0,365	35	0,702
337	18	0,375	36	0,678
450	12,75	0,375	35	0,676
400	12,75	0,375	35	0,657

### 4.3 Analisis *Fatigue* menggunakan *Cumulative Damage*

Analisis *fatigue* dilakukan menggunakan bantuan SACS 5.7. Analisis ini bertujuan untuk mengetahui nilai *service life* pada tiap-tiap *joint platform* Attaka B. Nilai *service life* yang terendah digunakan untuk menentukan *joint* kritis. Tabel 4.4 merupakan hasil analisis *fatigue* :

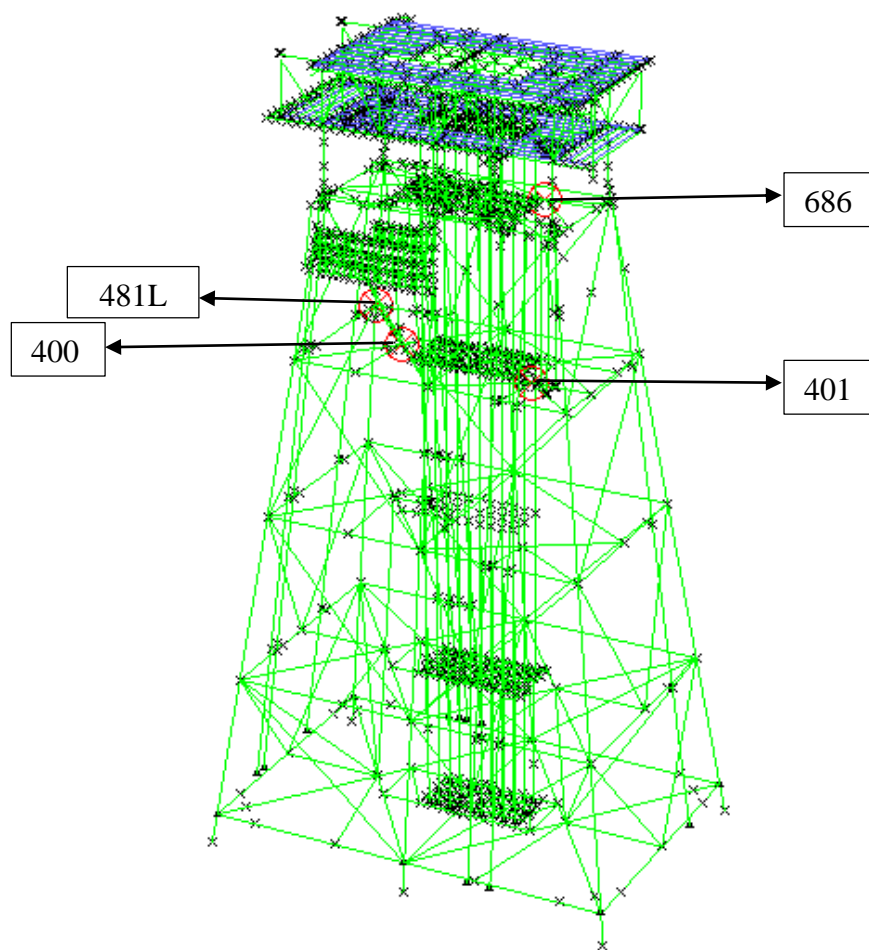
**Tabel 4.4** *Member dengan Service life Terendah*

<i>Joint</i>	<i>Member</i>	<i>Member Type</i>	<i>Service life (Year)</i>
400	402-400	CHD	4,45
	400-0037	BRC	4,54
401	401-459	BRC	40,21
	401-490	CHD	4,70
686	689-686	BRC	42,90
	686-680	CHD	6,05
481L	481L-419	BRC	6,81
	381L-481L	CHD	29,84

Dari Tabel 4.4 dapat dilihat *member* dengan nilai *service life* terendah terletak pada *member* 402-400 dan pada *joint* 400. Akan tetapi setelah dimodelkan dan dianalisa *joint* 400 memiliki 7 *member* yang membuat *joint* menjadi rumit sehingga hasil *running ANSYS* tidak sesuai. Ketidak sesuaian ini berupa tegangan maksimum yang seharusnya berada di titik dekat las-lasan berpindah ke salah satu ujung *member* yang membuat analisis tidak dapat dilanjutkan. Sehingga, *joint* kritis yang



digunakan ialah *joint* 401 yang tidak terlalu rumit. Dari analisis *fatigue* dapat ditentukan sambungan kritis pada struktur dengan ditunjukkan nilai *fatigue damage* tertinggi. Dari nilai tersebut dapat dikatakan bahwa *joint* yang memiliki nilai *fatigue damage* tertinggi mengalami beban siklis terbesar diantara *joint* lainnya. Kemudian *input* pembebanan pada *joint* terkritis dapat diambil dari analisis *inplace* dikarenakan hasil analisis *fatigue* berupa tegangan (*stress*) tidak dapat diinput secara langsung saat dilakukan pemodelan numerik. Gambar 4.2 merupakan letak *joint-joint* setelah analisis *fatigue* yang terdapat pada Tabel 4.4 di atas :



**Gambar 4.2** Letak *Joint-joint* Analisis *Fatigue*

Analisis *fatigue* dengan SACS 5.7 yang dilakukan juga dapat menghasilkan nilai *cumulative damage* pada tiap-tiap *joint*. Nilai ini berguna untuk menentukan umur kelelahan dalam satuan *cycle*. *Cumulative damage* keempat *joint* diatas dapat dilihat pada Tabel 4.5.

**Tabel 4.5** *Cumulative Damage*

<i>Joint</i>	<i>Member</i>	<i>Cumulative Damage</i>
400	402-400	13,36
	400-0037	13,22
401	401-459	1,49
	401-490	12,77
686	689-686	1,39
	686-680	9,91
481L	481L-419	8,81
	381L-481L	2,01

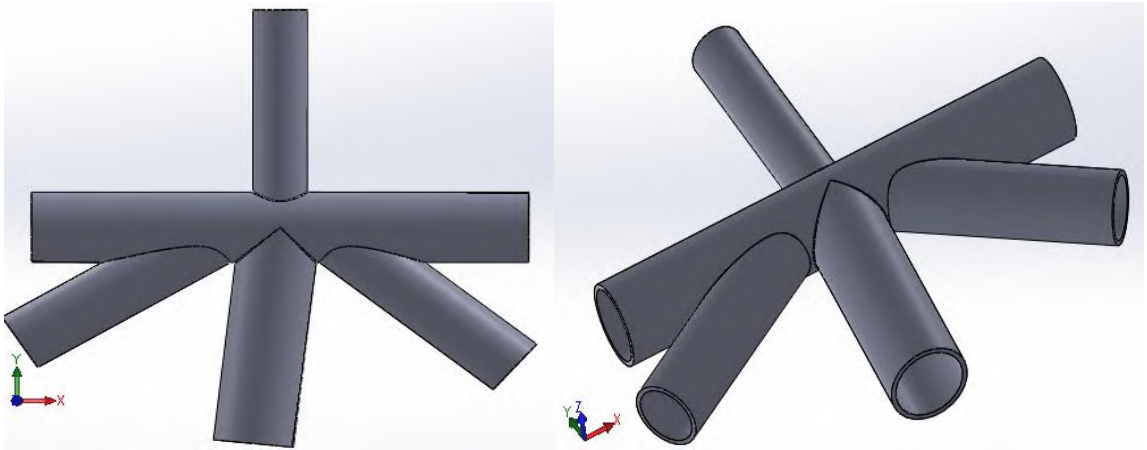
#### 4.4 Pemodelan Sambungan Kritis

*Joint* 401 merupakan termasuk tipe *multiplanar tubular joint*. Tabel 4.6 menjelaskan *profile* tiap-tiap *member* yang terhubung dengan *joint* 401 :

**Tabel 4.6** *Profile member pada joint 401*

<i>Member</i>	<i>Length</i> (in)	<i>Diameter</i> (in)	<i>Thickness</i> (in)
401-419L	299,32	10,75	0,365
409L-401	363,64	10,75	0,365
405-401	193,23	12,75	0,375
401-453	229,59	12,75	0,375
401-433	59,49	12,75	0,375
401-459	49,356	8,625	0,322

Pemodelan *joint* kritis ini dilakukan dengan menggunakan *software solidwork*. Dari panjang tiap *member* yang dijelaskan pada tabel 4.6 maka panjang untuk pemodelan tiap *member* dibuat dengan ukuran 39,37 in atau 1 meter agar model lebih sederhana. Model sambungan las-lasan juga dimodelkan dengan ketebalan las-lasan 0,1875 in. Hal ini sesuai dengan ketentuan AWS D1.1M-2010, apabila ketebalan *tubular*  $0,25 < T \leq 0,5$  (dalam in) maka tebal las-lasan sebesar 0,1875 in. Dari Tabel 4.6 diatas maka dapat dimodelkan *joint* kritis seperti Gambar 4.3 dibawah ini :

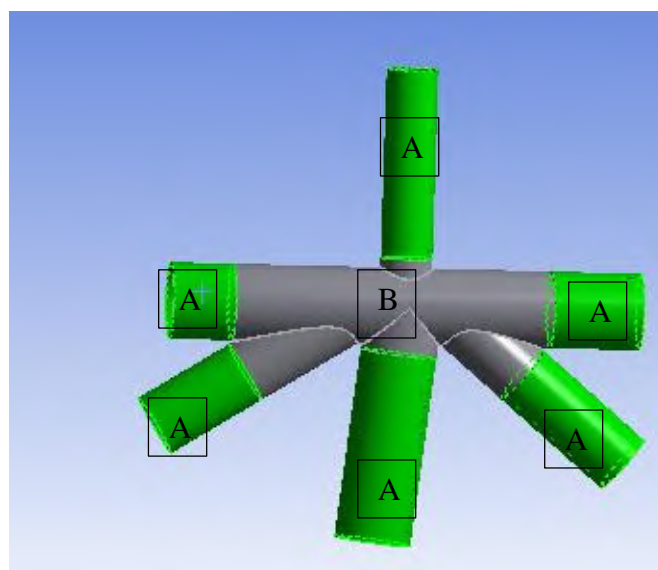


**Gambar 4.3** Pemodelan *Joint* Kritis 401

Format file *solidwork* dalam bentuk parasolid (.x\_t) agar mudah saat diimport ke *software ANSYS* untuk proses selanjutnya. Setelah pemodelan *joint* kritis selesai maka pemodelan tersebut diimport ke *software ANSYS*.

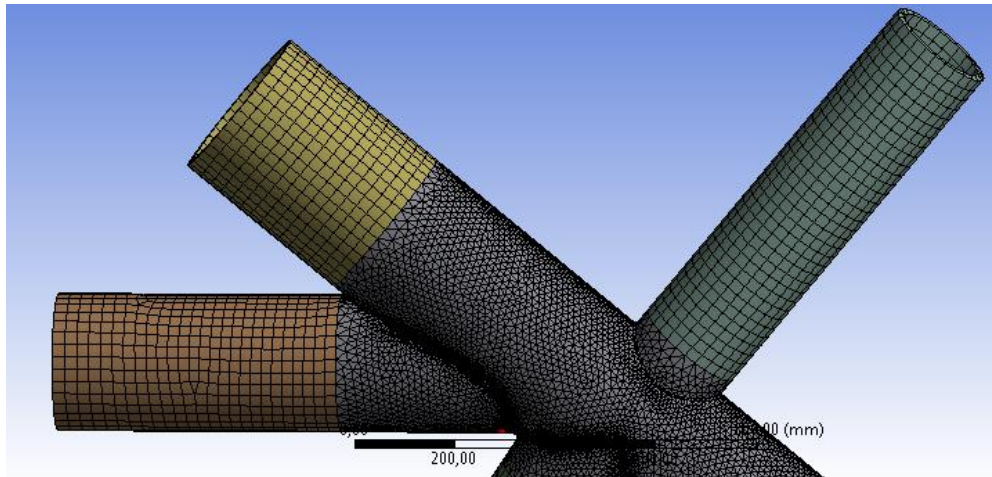
#### 4.4.1 *Meshing*

Pada *ANSYS* pemodelan *joint* kritis diberi *meshing*. *Meshing* dapat diatur kerapatannya agar gaya-gaya yang bekerja pada model dapat terkonsentrasi pada daerah *meshing* yang lebih rapat. Pada tugas akhir ini, model *joint* kritis dibagi menjadi beberapa bagian agar pada saat *meshing* dapat berbeda-beda tiap bagiannya. Bagian-bagian tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.4 di bawah ini dimana label A merupakan bagian ujung sedangkan label B merupakan bagian tengah yang merupakan pertemuan antar *member*.



**Gambar 4.4** Bagian-bagian *Joint* Kritis

Pada label A penulis menggunakan ukuran element untuk *meshing* sebesar 25 mm sedangkan pada label B menggunakan ukuran element sebesar 15 mm. Gambar 4.5 merupakan pemodelan *joint* kritis yang telah di *meshing* :



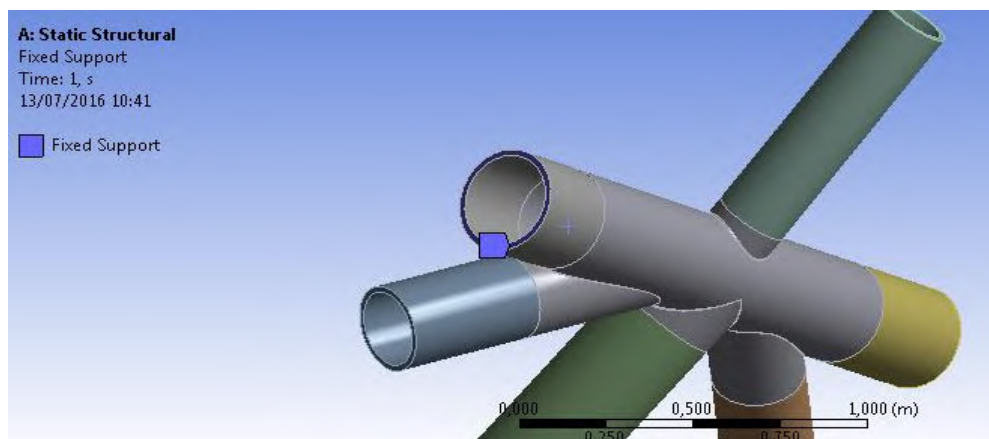
Gambar 4.5 Meshing pada Joint Kritis 401

*Meshing* juga berpengaruh pada saat proses *running* untuk mengetahui nilai *hot spot stress*. Oleh karena itu, perlu dilakukannya *meshing sensitivity* yaitu suatu cara yang mengubah kerapatan *meshing* hingga *hot spot stress* memiliki nilai konstan. *Meshing sensitivity* akan dibahas pada subbab selanjutnya.

## 4.5 Input Pembebanan pada Sambungan Kritis

### 4.5.1 Penentuan Sarat Batas

Penentuan sarat batas bertujuan agar model yang digunakan saat terkena beban, sesuai dengan kondisi asli pada saat berada di lapangan. Sarat batas ini terdiri dari penentuan *fixed support* pada salah satu sisi *chord joint* 401. Pada kasus ini *fixed support* diletakkan pada *member* 401-433. Untuk lebih memperjelas maka penentuan *fixed support* dapat dilihat pada Gambar 4.6 dibawah ini :



Gambar 4.6 Fixed Support Joint 401

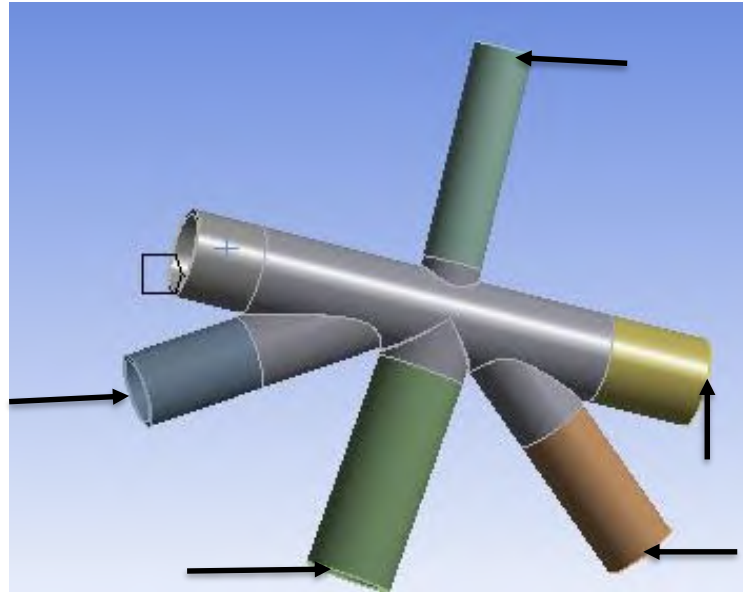
#### 4.5.2 Pembebanan pada Model

Pembebanan pada sambungan kritis didapat pada analisis *inplace* dengan bantuan SACS untuk selanjutnya diinput ke *joint* kritis pada ANSYS 16.0. Pembebanan yang digunakan terdiri dari 6 gaya antara lain gaya aksial ( $F_x$ ), gaya geser arah-y ( $F_y$ ), gaya geser arah-z ( $F_z$ ), momen puntir atau torsi ( $M_x$ ), momen arah-y ( $M_y$ ), serta momen arah-z ( $M_z$ ). Pada *member* 401-433 yang merupakan letak *fixed support* tidak perlu diberi pembebanan sedangkan *member* yang lain diberi pembebanan dibagian ujungnya. Pada saat pemberian pembebanan pada ANSYS perlu diperhatikan arah pembebanan agar sesuai dengan pembebanan sebenarnya. Hal lain yang perlu diperhatikan ialah satuan yang digunakan, karena satuan yang digunakan dalam SACS dan ANSYS berbeda. Pembebanan yang digunakan dalam analisis ini ialah dari beban persebaran gelombang dominan yang mengenai struktur. Beban gelombang dominan terjadi pada arah tenggara (*south east*) dengan tinggi gelombang 0,625 m dan periode 7,7 detik (lihat tabel 3.3 dan 3.4). Tabel 4.7 merupakan gaya pembebanan yang terjadi pada tiap *member* yang terhubung pada joint 401.

**Tabel 4.7** Gaya Pembebanan *Member* pada *Joint* 401

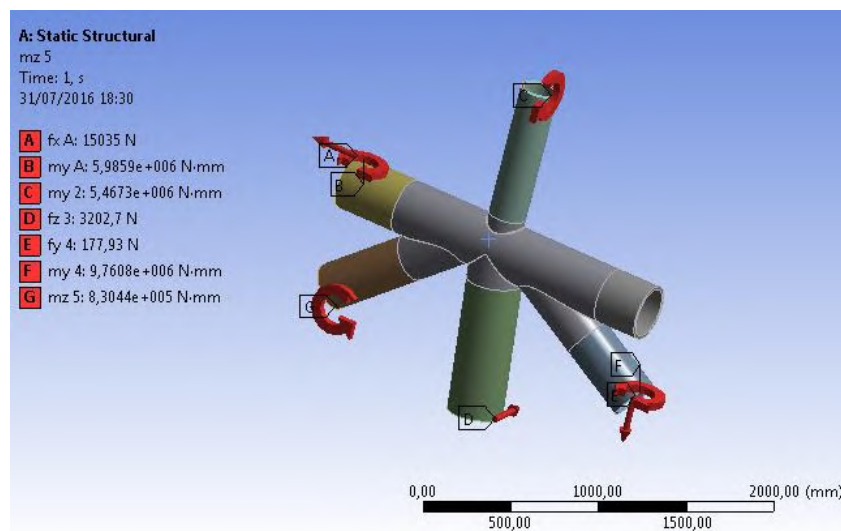
<i>Member</i>	Gaya					
	$f_x$ (kips)	$f_y$ (kips)	$f_z$ (kips)	$M_x$ (kips.in)	$M_y$ (kips.in)	$M_z$ (kips.in)
401-419L	4,4	-0,04	-0,83	11,45	-125,39	-7,35
409L-401	-3,68	-0,04	0,63	-15,73	-86,39	4,42
405-401	-0,79	-0,08	0,72	-3,89	-68,98	1,51
401-490	-3,38	-0,35	0,51	47,51	52,98	17,98
433-401	2,66	1,65	-0,2	-6,54	61,32	-37,82
401-459	-1,98	-0,65	0,21	-1,26	48,39	-14,04

Setelah mengetahui pembebanan yang ditumpu oleh tiap *member joint* kritis Attaka B pada Tabel 4.7 diatas, setelah itu diinputkan ke model *joint* kritis pada ANSYS. Geometri yang digunakan untuk meletakkan pembebanan ialah pada ujung tiap-tiap *member* yang ditunjukkan dengan tanda anak panah pada Gambar 4.7 di bawah ini.



**Gambar 4.7** Ujung Tiap-Tiap *Member* Kritis

Seperti yang dijelaskan sebelumnya hal yang perlu diperhatikan saat *input* pembebanan ialah arah gaya pembebanan dan juga satuan yang digunakan. Setelah proses *input* pembebanan selesai, maka hasilnya dapat dilihat pada Gambar 4.8.



**Gambar 4.8** Hasil *Input* Pembebanan pada ANSYS 16.0

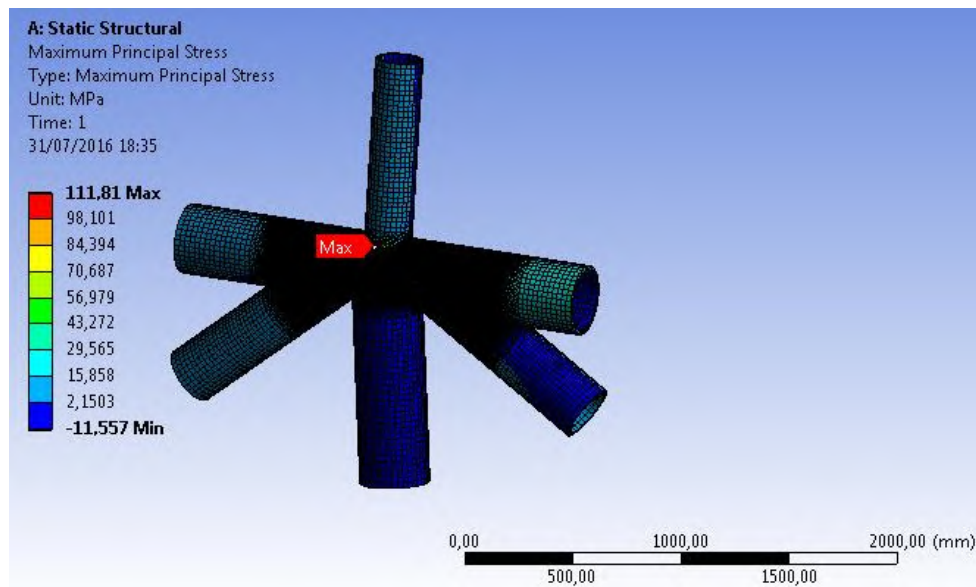
## 4.6 Pemodelan *Initial Crack*

### 4.6.1 *Hot Spot Stress*

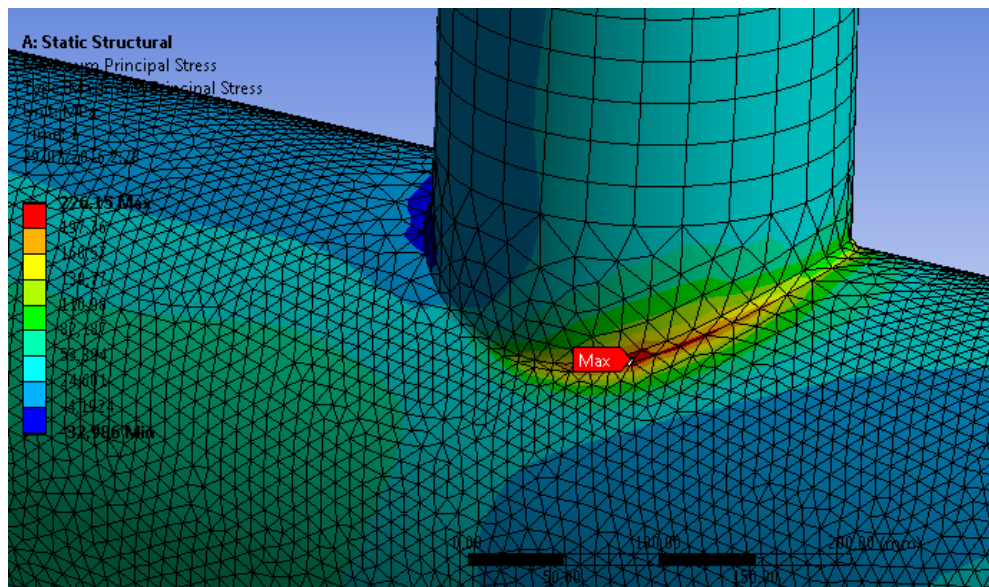
Sebelum membuat model *crack*, perlu diketahui nilai dan letak *hot spot stress*. Hal ini dilakukan karena kebanyakan *crack* akan terjadi di daerah dengan konsentrasi tegangan tertinggi. Pada *tubular joint*, *hot spot stress* biasa terjadi pada daerah las-lasan. Gambar 4.9 memperlihatkan nilai dan letak dari *hot spot stress* untuk *joint*



kritis 401 *platform* Attaka B dan Gambar 4.10 merupakan gambar detail dari letak *hot spot stress*.



**Gambar 4.9** *Hot Spot Stress Joint Kritis 401*

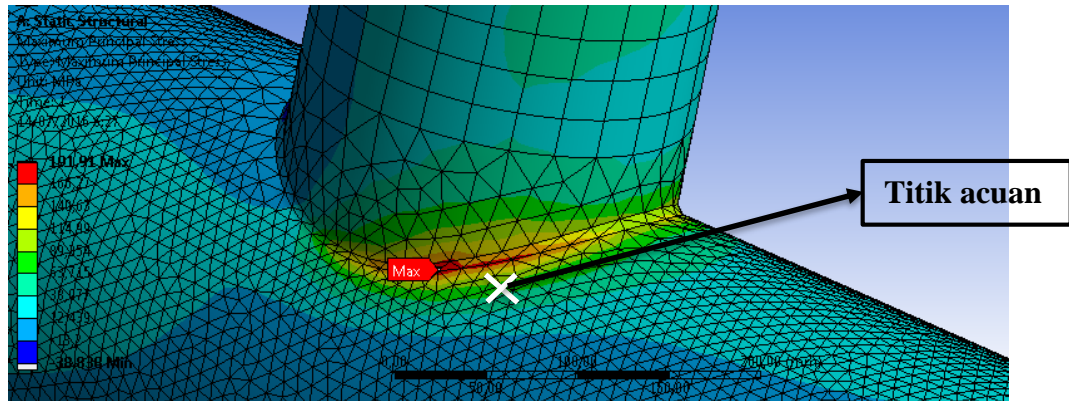


**Gambar 4.10** *Hot Spot Stress Joint Kritis 401 Detail*

#### 4.6.2 *Meshing Sensitivity*

Seperti yang telah dijelaskan pada subbab diatas, *meshing sensitivity* bertujuan untuk mengetahui nilai tegangan maksimum yang konstan setelah dilakukan *running* pada model *joint* kritis ANSYS. Dikarenakan tegangan maksimum (*hot spot stress*) berada di las-lasan seperti yang terlihat pada Gambar 4.9 dan 4.10 diatas maka ukuran element yang diubah hanya pada bagian tersebut. Ukuran element yang digunakan mulai dari 20 mm hingga 8 mm. *Meshing sensitivity* dilakukan pada

satu titik yang dekat dengan *hot spot stress* lebih tepatnya 0,375 in dari *hot spot stress*. Titik tersebut sebagai acuan apakah tegangan yang terjadi di titik itu sudah konstan atau belum. Gambar 4.11 memperlihatkan titik acuan untuk *meshing sensitivity*.

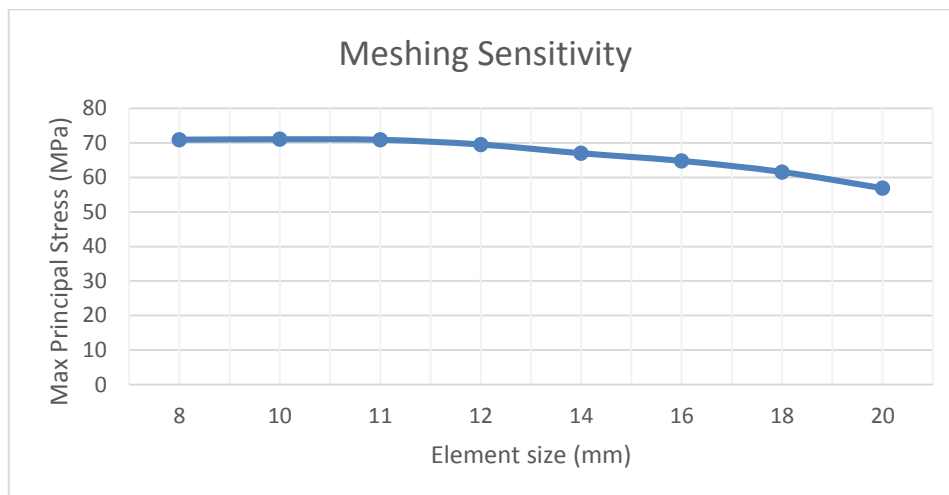


**Gambar 4.11** Titik Acuan *Meshing Sensitivity*

Dari *meshing sensitivity* yang telah dilakukan, didapatkan hasil *meshing sensitivity* sesuai dengan Tabel 4.8 dan juga digambarkan dalam bentuk kurva pada Gambar 4.12 dibawah ini :

**Tabel 4.8** Hasil *Meshing Sensitivity*

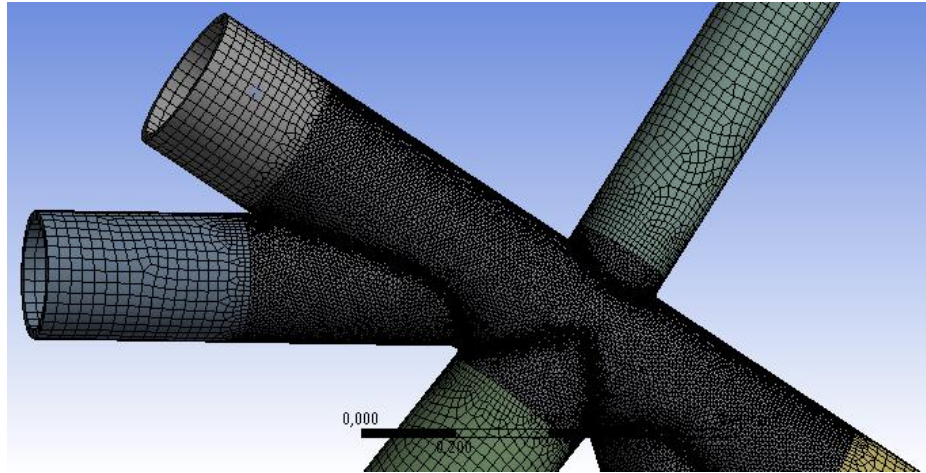
Element size (mm)	Max Principal Stress (Mpa)	Element size (mm)	Max Principal Stress (Mpa)
8	70,98	14	67,04
10	71,09	16	64,82
11	70,95	18	61,61
12	69,58	20	56,90



**Gambar 4.12** Kurva *Meshing Sensitivity*



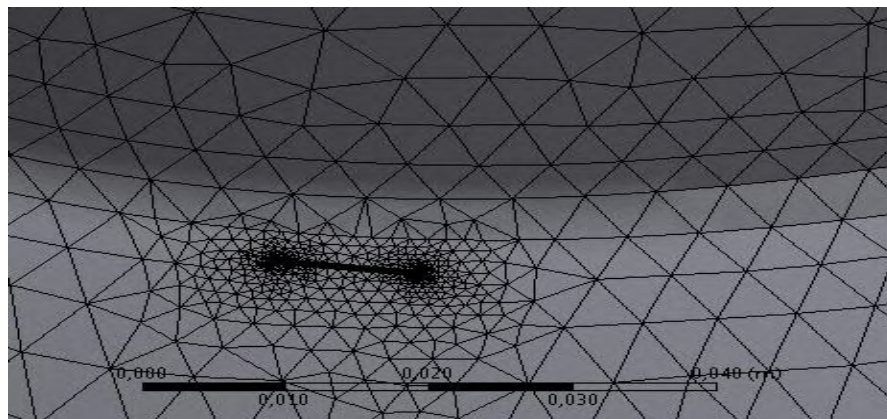
Dari hasil diatas maka ukuran *element meshing* yang digunakan dalam proses selanjutnya sebesar 10 mm dikarenakan *maximum principal stress* sudah stabil dan hasil *meshing*nya terlihat pada Gambar 4.13.



Gambar 4.13 Element Meshing 10 mm

#### 4.6.3 Initial Crack Joint Kritis

Bentuk *crack* yang dimodelkan pada *joint* kritis 401 ialah *semi-elliptical* dengan jenis *surface crack*. Kedalaman retak ( $a_0$ ) yang dimodelkan pada tugas akhir ini yaitu 0,75 mm. Kedalaman retak berhubungan dengan panjang *initial crack* ( $2c$ ) dimana semakin besar kedalaman retak maka semakin besar pula panjang retaknya. Hubungan antara *initial crack* dengan kedalaman biasanya dinotasikan dengan  $\frac{a}{2c}$  dimana pada tugas akhir ini nilai  $\frac{a}{2c}$  yang digunakan konstan sebesar 0,15. Bila  $a_0 = 0,75$  mm maka panjang retak ( $2c$ ) = 5 mm. *Crack* yang dimodelkan diletakkan pada titik acuan seperti pada titik *meshing sensitivity* yaitu 0,375 in dari *hot spot stress*. Gambar 4.14 memperlihatkan model *joint* kritis dengan panjang *initial crack* sebesar 5 mm.



Gambar 4.14 Initial Crack Joint Kritis

Pemodelan *crack* ini terus dilakukan dari kedalaman retak yang awalnya 0,75 mm hingga mencapai kedalaman 9,525 mm yang merupakan tebal dari *member* tempat *crack* dimodelkan. Tabel 4.9 berisikan perbandingan antara panjang *crack* ( $2c$ ) dengan kedalaman retak ( $a_0$ ) dengan nilai  $\frac{a}{2c} = 0,15$ .

**Tabel 4.9** Perbandingan Panjang *Crack* dengan Kedalaman Retak

a (mm)	2c (mm)	a (mm)	2c (mm)
0,75	5,0	5,25	35,0
1,25	8,3	5,75	38,3
1,75	11,7	6,25	41,7
2,25	15,0	6,75	45,0
2,75	18,3	7,25	48,3
3,25	21,7	7,75	51,7
3,75	25,0	8,25	55,0
4,25	28,3	8,75	58,3
4,75	31,7	9,25	61,7

#### 4.7 Perhitungan *Stress Intensity Factor* (SIF)

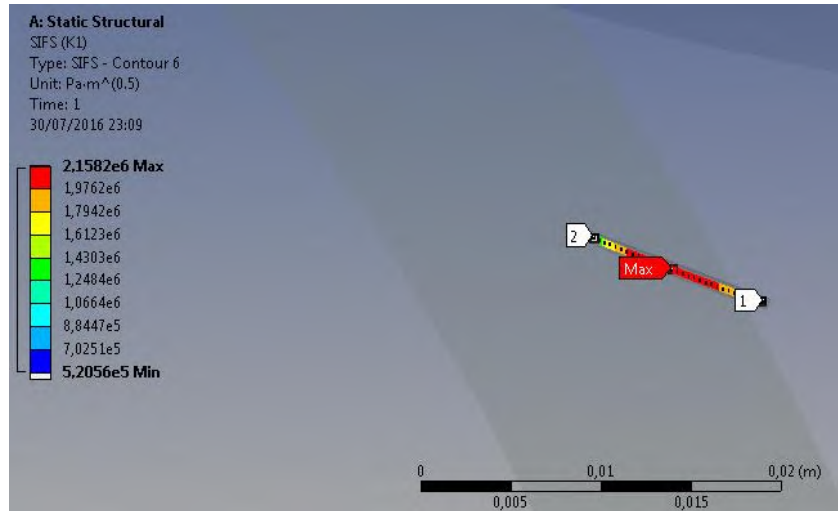
##### 4.7.1 Perhitungan SIF dengan ANSYS

Perhitungan *Stress Intensity Factor* (SIF) menggunakan ANSYS didapat setelah memodelkan *crack*. Perhitungan ini dilakukan tiap penambahan panjang *crack* (dijelaskan pada subbab 4.6.3) sehingga didapatkan nilai *Stress Intensity Factor* (SIF) yang berbeda-beda. Nilai SIF ini digunakan untuk menghitung nilai *crack propagation rate* hingga nilai *cycle joint* 401. Tabel 4.10 berisi nilai SIF tiap penambahan panjang *crack* untuk pembebanan yang terjadi.

**Tabel 4.10** Nilai SIF tiap Penambahan Panjang *Crack*

a (mm)	$\Delta K$ (MPa $\sqrt{m}$ )	$\Delta K$ (ksi $\sqrt{in}$ )	a (mm)	$\Delta K$ (MPa $\sqrt{m}$ )	$\Delta K$ (ksi $\sqrt{in}$ )
0,75	2,15	1,96	5,25	5,31	4,83
1,25	2,70	2,46	5,75	5,51	5,01
1,75	3,17	2,88	6,25	5,74	5,22
2,25	3,60	3,28	6,75	5,94	5,41
2,75	3,87	3,52	7,25	6,19	5,63
3,25	4,18	3,80	7,75	6,35	5,77
3,75	4,48	4,08	8,25	6,57	5,98
4,25	4,74	4,31	8,75	6,73	6,12
4,75	5,02	4,57	9,25	6,89	6,27

Gambar 4.15 dibawah ini merupakan contoh hasil nilai *stress intensity factor* (*SIF*) yang didapatkan dari proses *running ANSYS 16.0* dengan kedalaman retak  $a = 0,75$  mm .



**Gambar 4.15** Contoh Hasil SIF pada ANSYS

#### 4.7.2 Perhitungan SIF manual

Perhitungan *Stress Intensity Factor* (*SIF*) secara manual dilakukan untuk melakukan validasi dengan *Stress Intensity Factor* (*SIF*) dari hasil ANSYS. Dikarenakan jenis *crack* yang dimodelkan ialah *surface crack* maka persamaan yang digunakan sesuai dengan persamaan sebagai berikut :

$$K_I = 1,12 \Delta\sigma \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} M_k$$

Penjelasan dari persamaan diatas sebagai berikut :

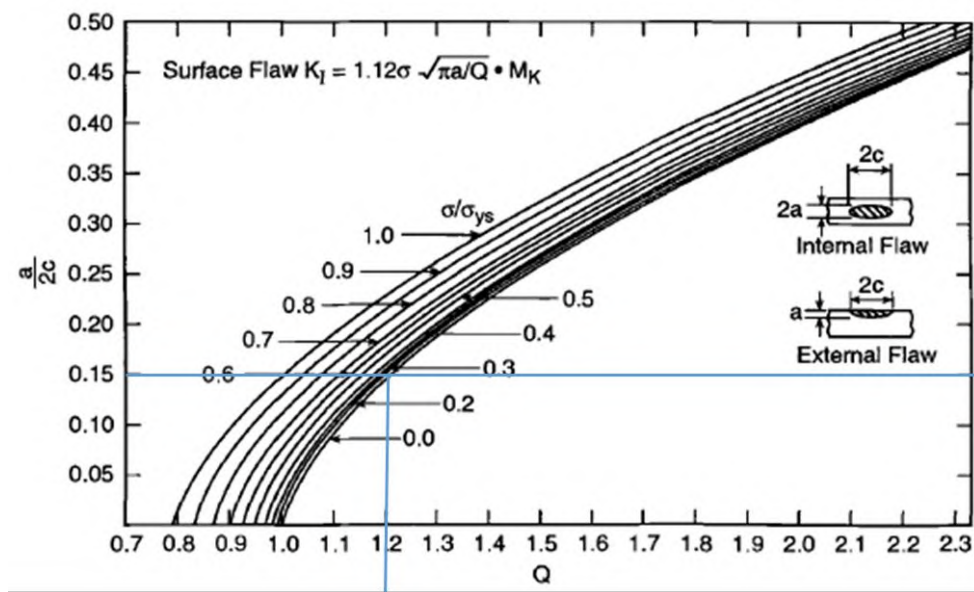
- Nilai  $\Delta\sigma$ , merupakan selisih antara tegangan pada saat pembebanan maksimum dengan tegangan saat pembebanan minimum. Nilai tegangan ini didapatkan dengan menggunakan fasilitas *probe* pada *software ANSYS*. Fasilitas ini memudahkan pengguna ANSYS untuk mengetahui tegangan yang terjadi pada titik model yang akan ditinjau.

$$\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$$

Dari ANSYS diketahui bahwa nilai  $\Delta\sigma = 38,91$  MPa atau 5,64 ksi.

- Nilai  $a$ , merupakan kedalaman retak yang nilainya sesuai dengan pemodelan *crack*.

- c. Nilai Q, faktor koreksi *front free surface* didapatkan dari grafik pada gambar 2.4 yang merupakan perbandingan antara nilai  $\frac{a}{2c}$  dengan  $\frac{\sigma}{\sigma_{ys}}$ .  $\sigma$  merupakan tegangan di titik acuan tempat *crack* dimodelkan yang memiliki nilai sebesar 38,91 Mpa. Sedangkan  $\sigma_{ys}$  memiliki nilai sebesar 240 Mpa dikarenakan material yang digunakan ialah baja A35. Maka, nilai  $\frac{\sigma}{\sigma_{ys}} = 0,16$  yang apabila dimasukkan pada grafik Gambar 4.16 didapatkan nilai Q sebesar = 1,2



Gambar 4.16 Nilai Q perhitungan SIF manual

- d. Nilai  $M_k$ , disebut juga dengan faktor koreksi *back free surface*. Seperti yang dijelaskan pada persamaan (2.14), nilai  $M_k$  bergantung pada kedalaman retak dibagi tebal material ( $\frac{a}{t}$ ). Berikut merupakan syarat nilai  $M_k$ :

$$M_K = 1,0 + 1,2 \left( \frac{a}{t} - 0,5 \right)$$

$$\frac{a}{t} < 0,5 \text{ maka } M_k = 1$$

$$\frac{a}{t} \geq 0,5 \text{ maka } M_k \text{ dihitung menggunakan persamaan diatas}$$

Dari penjelasan persamaan diatas, maka didapatkan nilai *Stress Intensity Factor* (SIF) atau  $K_I$  yang telah dimasukkan ke dalam Tabel 4.11 dibawah ini. Kedalaman retak dengan satuan mm dikonversikan menjadi in untuk memudahkan dalam perhitungan  $\Delta K$ .

**Tabel 4.11** Nilai SIF Perhitungan Manual

a (in)	M <sub>k</sub>	ΔK (ksi√in)	a (in)	M <sub>k</sub>	ΔK (ksi√in)
0,03	1,00	1,76	0,21	1,06	4,94
0,05	1,00	2,27	0,23	1,12	5,47
0,07	1,00	2,68	0,25	1,19	6,03
0,09	1,00	3,04	0,27	1,25	6,60
0,11	1,00	3,37	0,29	1,31	7,18
0,13	1,00	3,66	0,31	1,38	7,78
0,15	1,00	3,93	0,33	1,44	8,40
0,17	1,00	4,18	0,34	1,50	9,02
0,19	1,00	4,42	0,36	1,57	9,67

#### 4.8 Perhitungan Kecepatan Perambatan Retak

Retak dapat merambat bila berada dalam *region* II dari kurva perbandingan SIF range dengan *crack growth rate* seperti gambar 2.3. Perhitungan kecepatan perambatan retak dilakukan menggunakan hukum paris-erdogan seperti persamaan (2.10) :

$$\frac{da}{dN} = C (\Delta K)^m$$

Keterangan :

a = kedalaman retak

N = jumlah *cycle*

C dan m= konstanta material

ΔK = perubahan *stress intensity factor*

Seperti yang telah dibahas pada bab sebelumnya, tugas akhir ini menggunakan material ferrite-pearlite. Untuk material ferrite-pearlite memiliki nilai C = 3,6 x 10<sup>-10</sup> ksi√in dan nilai m = 3. Sedangkan, nilai ΔK didapatkan dari perhitungan SIF diatas, maka persamaannya menjadi :

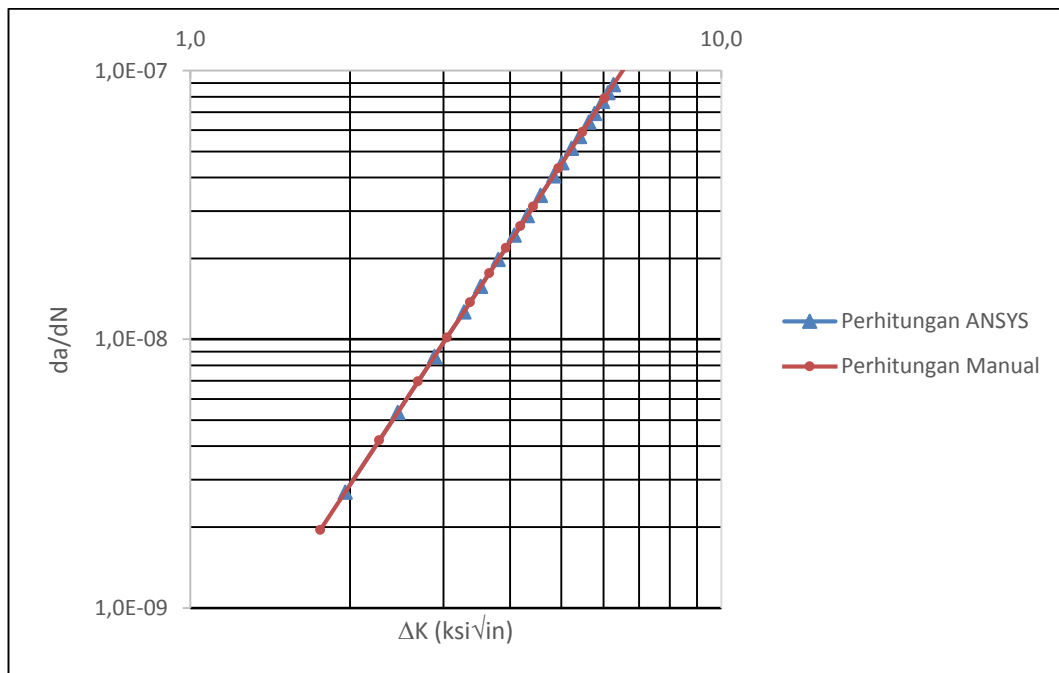
$$\frac{da}{dN} = 3,6 \times 10^{-10} (\Delta K)^3$$

Perhitungan diatas disederhanakan ke dalam bentuk Tabel 4.12.

**Tabel 4.12** Kecepatan Perambatan Retak

Perhitungan menggunakan ANSYS			Perhitungan Manual		
a (in)	$\Delta K$ (ksi $\sqrt{\text{in}}$ )	da/dN	a (in)	$\Delta K$ (ksi $\sqrt{\text{in}}$ )	da/dN
0,03	1,96	2,7E-09	0,03	1,76	2,0E-09
0,05	2,46	5,3E-09	0,05	2,27	4,2E-09
0,07	2,88	8,6E-09	0,07	2,68	7,0E-09
0,09	3,28	1,3E-08	0,09	3,04	1,0E-08
0,11	3,52	1,6E-08	0,11	3,37	1,4E-08
0,13	3,80	2,0E-08	0,13	3,66	1,8E-08
0,15	4,08	2,4E-08	0,15	3,93	2,2E-08
0,17	4,31	2,9E-08	0,17	4,18	2,6E-08
0,19	4,57	3,4E-08	0,19	4,42	3,1E-08
0,21	4,83	4,1E-08	0,21	4,94	4,3E-08
0,23	5,01	4,5E-08	0,23	5,47	5,9E-08
0,25	5,22	5,1E-08	0,25	6,03	7,9E-08
0,27	5,41	5,7E-08	0,27	6,60	1,0E-07
0,29	5,63	6,4E-08	0,29	7,18	1,3E-07
0,31	5,77	6,9E-08	0,31	7,78	1,7E-07
0,33	5,98	7,7E-08	0,33	8,40	2,1E-07
0,34	6,12	8,3E-08	0,34	9,02	2,6E-07
0,36	6,27	8,9E-08	0,36	9,67	3,3E-07

Dari tabel 4.12 mengenai kecepatan perambatan retak diatas maka dapat dibuat kurva kecepatan perambatan retak dengan nilai SIF seperti pada Gambar 4.17.



**Gambar 4.17** Kurva Kecepatan Perambatan Retak

## 4.9 Perhitungan Umur Kelelahan

### 4.9.1 Metode Cumulative Damage

*Joint* 401 yang digunakan sebagai *joint* kritis memiliki nilai *cumulative damage* sebesar 12,77 pada *member* 401-490. Dari nilai tersebut dapat diketahui jumlah siklus atau *cycle* yang terjadi dengan menggunakan persamaan 4.1 seperti berikut :

$$N = 2 \times 10^6 \left( \frac{\Delta\sigma}{\Delta\sigma_{ref}} \right)^{-m} \quad (4.1)$$

Nilai  $\Delta\sigma_{ref}$  yang digunakan ialah sebesar 11,4 ksi dengan  $m = 3,74$  serta  $\Delta\sigma = 5,64$  ksi . Dengan menggunakan persamaan diatas, dilakukan perhitungan jumlah siklus dalam kurva S-N sebagai berikut.

$$N = 2 \times 10^6 \left( \frac{5,64}{11,4} \right)^{-3.74}$$

$$N = 2,8 E + 07 \text{ cycles}$$

Kemudian jumlah siklus yang dialami *joint* 401 dapat dihitung menggunakan persamaan 4.2 seperti berikut :

$$D = \sum_{i=1}^i \frac{N_{applied_i}}{N_{resisted_i}} \quad (4.2)$$

Perhitungan jumlah siklus yang terjadi pada *joint* 401 dapat dijelaskan sebagai berikut.

$$D = \sum \left( \frac{n}{N} \right)$$

$$n = D \times N$$

$$n = 12,77 \times 2,8E + 07$$

$$n = 3,55E + 08 \text{ cycles}$$

Dari nilai siklus *joint* 401 diatas dapat dikonversi ke dalam satuan tahun dengan menggunakan perhitungan berikut.

$$\text{Fatigue life} = n \times T(\text{periode gelombang})$$

$$\text{Fatigue life} = 3,55E+08 \times 7,7$$

$$Fatigue\ life = 2,73E+09\ detik.$$

Dengan nilai 1 tahun = 31536000 detik, maka nilai *fatigue life* pada *joint* 401 menggunakan pendekatan *cumulative damage* sebesar 86,7 tahun.

#### 4.9.2 Metode Fracture Mechanics

Umur kelelahan didapatkan dengan menggunakan persamaan di bawah ini :

$$N = \int_{a_0}^{a_f} \frac{da}{C (\Delta K)^m}$$

Keterangan :

$a_0$  = kedalaman retak awal (*initial crack*)

$a_f$  = kedalaman retak akhir (*final crack*)

$N$  = jumlah *cycle*

$\Delta K$  = perubahan *stress intensity factor*

$C$  dan  $m$  = konstanta material

Dari persamaan diatas perhitungan umur kelalahan dengan metode *fracture mechanics* ditampilkan dalam tabel 4.13

**Tabel 4.13** Perhitungan Umur Kelalahan *Fracture Mechanics*

Perhitungan menggunakan ANSYS				Perhitungan Manual			
a (in)	$\Delta K$ (ksi $\sqrt{in}$ )	da/dN	$\Delta N$	a (in)	$\Delta K$ (ksi $\sqrt{in}$ )	da/dN	$\Delta N$
0,03	1,96	2,7E-09	1,1E+07	0,03	1,76	1,95E-09	1,5E+07
0,05	2,46	5,3E-09	9,2E+06	0,05	2,27	4,2E-09	1,2E+07
0,07	2,88	8,6E-09	8,0E+06	0,07	2,68	6,96E-09	9,9E+06
0,09	3,28	1,3E-08	7,0E+06	0,09	3,04	1,02E-08	8,7E+06
0,11	3,52	1,6E-08	6,9E+06	0,11	3,37	1,37E-08	7,9E+06
0,13	3,80	2,0E-08	6,5E+06	0,13	3,66	1,76E-08	7,3E+06
0,15	4,08	2,4E-08	6,1E+06	0,15	3,93	2,19E-08	6,8E+06
0,17	4,31	2,9E-08	5,8E+06	0,17	4,18	2,64E-08	6,3E+06
0,19	4,57	3,4E-08	5,5E+06	0,19	4,42	3,12E-08	6,0E+06
0,21	4,83	4,1E-08	5,1E+06	0,21	4,94	4,33E-08	4,8E+06
0,23	5,01	4,5E-08	5,0E+06	0,23	5,47	5,91E-08	3,8E+06
0,25	5,22	5,1E-08	4,8E+06	0,25	6,03	7,88E-08	3,1E+06
0,27	5,41	5,7E-08	4,7E+06	0,27	6,60	1,03E-07	2,6E+06
0,29	5,63	6,4E-08	4,4E+06	0,29	7,18	1,33E-07	2,1E+06
0,31	5,77	6,9E-08	4,4E+06	0,31	7,78	1,7E-07	1,8E+06
0,33	5,98	7,7E-08	4,2E+06	0,33	8,40	2,13E-07	1,5E+06



**Tabel 4.13** Perhitungan Umur Kelelahan *Fracture Mechanics* (lanjutan)

Perhitungan menggunakan ANSYS				Perhitungan Manual			
a (in)	$\Delta K$ (ksi $\sqrt{\text{in}}$ )	da/dN	$\Delta N$	a (in)	$\Delta K$ (ksi $\sqrt{\text{in}}$ )	da/dN	$\Delta N$
0,34	6,12	8,3E-08	4,2E+06	0,34	9,02	2,65E-07	1,3E+06
0,36	6,27	8,9E-08	4,1E+06	0,36	9,67	3,25E-07	1,1E+06
$\Sigma N$			1,1E+08	$\Sigma N$			1,0E+08

Dan perbandingan antara umur kelelahan dengan metode *fracture mechanics* dari ANSYS dengan perhitungan manual dapat dilihat pada tabel 4.14.

**Tabel 4.14** Perbandingan Metode ANSYS dan Perhitungan Manual

Metode	Umur Kelelahan (cycle)
ANSYS	1,1E+08
Perhitungan Manual	1,0E+08

Hasil dari umur kelelahan diatas masih dalam satuan cycle, untuk mengubah satuan cycle menjadi tahun dilakukan dengan cara seperti pada perhitungan dengan metode *cumulative damage*.

$$\text{Fatigue life} = n \times T(\text{periode gelombang})$$

$$\text{Fatigue life} = 1,1 \text{ E}+08 \times 7,7$$

$$\text{Fatigue life} = 7,8\text{E}+08 \text{ detik.}$$

Dengan nilai 1 tahun = 31536000 detik, maka nilai *fatigue life* pada *joint* 401 menggunakan metode *fracture mechanics* sebesar 24,88 tahun.

#### 4.10 Perbandingan Umur Kelelahan

Perbandingan ini dilakukan antara umur kelelahan yang didapatkan dengan metode *fracture mechanics* dengan *cumulative damage* dari analisa *inplace*. Umur kelelahan dari kedua metode yang hasilnya menggunakan satuan cycle dikonversikan ke dalam satuan tahun. Tabel 4.15 berisi umur kelelahan dari *cumulative damage* dan *fracture mechanics*.

**Tabel 4.15** Perbandingan Umur Kelelahan

Metode	Umur Kelelahan (tahun)
<i>Cumulative Damage</i>	86,7
<i>Fracture Mechanics</i>	24,88

Umur kelelahan dengan metode cumulative damage lebih besar nilainya sebab pada saat analisa efek dari retak tidak dimasukkan sebagai salah satu parameter.

## **LAMPIRAN A**

### **Hasil Analisis Inplace**

* * J O I N T   C A N   S U M M A R Y * *								
(UNITY CHECK ORDER)								
***** ORIGINAL *****					***** DESIGN *****			
JOINT	DIAMETER (IN)	THICKNESS (IN)	YLD STRS (KSI)	UC	DIAMETER (IN)	THICKNESS (IN)	YLD STRS (KSI)	UC
232	16.000	0.375	35.000	1.196	16.000	0.375	35.000	1.196
323	14.000	0.375	36.000	1.036	14.000	0.375	36.000	1.036
481L	34.000	0.800	36.000	0.942	34.000	0.800	36.000	0.942
489L	34.000	0.800	36.000	0.835	34.000	0.800	36.000	0.835
605	10.750	0.365	35.000	0.834	10.750	0.365	35.000	0.834
686	10.750	0.365	35.000	0.753	10.750	0.365	35.000	0.753
336	18.000	0.375	36.000	0.717	18.000	0.375	36.000	0.717
401	12.750	0.375	35.000	0.716	12.750	0.375	35.000	0.716
678	10.750	0.365	35.000	0.702	10.750	0.365	35.000	0.702
337	18.000	0.375	36.000	0.677	18.000	0.375	36.000	0.677
450	12.750	0.375	35.000	0.676	12.750	0.375	35.000	0.676
400	12.750	0.375	35.000	0.655	12.750	0.375	35.000	0.655
501L	34.000	0.800	36.000	0.645	34.000	0.800	36.000	0.645
519L	34.000	0.800	36.000	0.634	34.000	0.800	36.000	0.634
401L	34.000	0.800	36.000	0.632	34.000	0.800	36.000	0.632
669	10.750	0.365	35.000	0.611	10.750	0.365	35.000	0.611
581L	34.000	0.800	36.000	0.604	34.000	0.800	36.000	0.604
0003	34.000	0.800	36.000	0.559	34.000	0.800	36.000	0.559
509L	34.000	0.800	36.000	0.538	34.000	0.800	36.000	0.538
604	10.750	0.365	35.000	0.527	10.750	0.365	35.000	0.527
0010	34.000	0.800	36.000	0.525	34.000	0.800	36.000	0.525
108	18.000	0.375	36.000	0.497	18.000	0.375	36.000	0.497
589L	34.000	0.800	36.000	0.474	34.000	0.800	36.000	0.474
609	10.750	0.365	35.000	0.473	10.750	0.365	35.000	0.473
599L	34.000	0.800	36.000	0.452	34.000	0.800	36.000	0.452
389L	34.000	0.800	36.000	0.447	34.000	0.800	36.000	0.447
381L	34.000	0.800	36.000	0.441	34.000	0.800	36.000	0.441
0100	34.000	0.800	36.000	0.430	34.000	0.800	36.000	0.430
201	18.000	0.375	36.000	0.411	18.000	0.375	36.000	0.411
203	18.000	0.375	36.000	0.391	18.000	0.375	36.000	0.391
499L	34.000	0.800	36.000	0.386	34.000	0.800	36.000	0.386
309L	34.000	0.800	36.000	0.364	34.000	0.800	36.000	0.364
419L	34.000	0.800	36.000	0.360	34.000	0.800	36.000	0.360
107	18.000	0.375	36.000	0.352	18.000	0.375	36.000	0.352
399L	34.000	0.800	36.000	0.347	34.000	0.800	36.000	0.347
453	14.000	0.375	35.000	0.346	14.000	0.375	35.000	0.346
681	10.750	0.365	35.000	0.317	10.750	0.365	35.000	0.317
319L	34.000	0.800	36.000	0.307	34.000	0.800	36.000	0.307
301L	34.000	0.800	36.000	0.304	34.000	0.800	36.000	0.304
289L	34.000	0.800	36.000	0.301	34.000	0.800	36.000	0.301
452	14.000	0.375	35.000	0.293	14.000	0.375	35.000	0.293
690	10.750	0.365	35.000	0.293	10.750	0.365	35.000	0.293
281L	34.000	0.800	36.000	0.282	34.000	0.800	36.000	0.282
409L	34.000	0.800	36.000	0.277	34.000	0.800	36.000	0.277
338	12.000	0.375	36.000	0.273	12.000	0.375	36.000	0.273
335	12.000	0.375	36.000	0.271	12.000	0.375	36.000	0.271
101	22.000	0.375	36.000	0.256	22.000	0.375	36.000	0.256
233	16.000	0.375	35.000	0.236	16.000	0.375	35.000	0.236
103	22.000	0.375	36.000	0.236	22.000	0.375	36.000	0.236
209L	34.000	0.800	36.000	0.228	34.000	0.800	36.000	0.228

* * J O I N T   C A N   S U M M A R Y * *								
(UNITY CHECK ORDER)								
***** ORIGINAL *****					***** DESIGN *****			
JOINT	DIAMETER (IN)	THICKNESS (IN)	YLD STRS (KSI)	UC	DIAMETER (IN)	THICKNESS (IN)	YLD STRS (KSI)	UC
219L	34.000	0.800	36.000	0.221	34.000	0.800	36.000	0.221
405	12.750	0.375	35.000	0.220	12.750	0.375	35.000	0.220
201L	34.000	0.800	36.000	0.216	34.000	0.800	36.000	0.216
451	14.000	0.375	35.000	0.210	14.000	0.375	35.000	0.210
698	10.750	0.365	35.000	0.206	10.750	0.365	35.000	0.206
299L	34.000	0.800	36.000	0.196	34.000	0.800	36.000	0.196
109L	34.000	0.875	36.000	0.179	34.000	0.875	36.000	0.179
455	10.750	0.365	36.000	0.170	10.750	0.365	36.000	0.170
189L	34.000	0.875	36.000	0.167	34.000	0.875	36.000	0.167
454	10.750	0.365	36.000	0.164	10.750	0.365	36.000	0.164
418	14.000	0.375	35.000	0.153	14.000	0.375	35.000	0.153
601	10.750	0.365	35.000	0.152	10.750	0.365	35.000	0.152
680	10.750	0.365	35.000	0.146	10.750	0.365	35.000	0.146
101L	34.000	0.875	36.000	0.130	34.000	0.875	36.000	0.130
119L	34.000	0.875	36.000	0.127	34.000	0.875	36.000	0.127
181L	34.000	0.875	36.000	0.126	34.000	0.875	36.000	0.126
105	20.000	0.375	36.000	0.123	20.000	0.375	36.000	0.123
199L	34.000	0.875	36.000	0.118	34.000	0.875	36.000	0.118
106	20.000	0.375	36.000	0.099	20.000	0.375	36.000	0.099
402	12.750	0.375	35.000	0.085	12.750	0.375	35.000	0.085
351	18.000	0.375	36.000	0.084	18.000	0.375	36.000	0.084
325	16.000	0.375	36.000	0.077	16.000	0.375	36.000	0.077
301	16.000	0.375	36.000	0.074	16.000	0.375	36.000	0.074
352	16.000	0.375	36.000	0.064	16.000	0.375	36.000	0.064
684	10.750	0.365	35.000	0.053	10.750	0.365	35.000	0.053
206	16.000	0.375	35.000	0.034	16.000	0.375	35.000	0.034
227	16.000	0.375	35.000	0.020	16.000	0.375	35.000	0.020

## **LAMPIRAN B**

### **Hasil Analisis Fatigue**

* * * M E M B E R F A T I G U E R E P O R T * * *															
(DAMAGE ORDER)															
ORIGINAL				CHORD											
REQUIRED	JOINT	MEMBER	GRUP	TYPE	OD	WT	JNT	MEM	LEN.	GAP	* STRESS	CONC.	FACTORS	* FATIGUE	RESULTS
OD	WT														
		ID	ID		(IN)	(IN)	TYP	TYP	(FT)	(IN)	AX-CR	AX-SD	IN-PL	OU-PL	DAMAGE LOC SVC LIFE
(IN)	(IN)														
400	400-	454	B03	TUB	10.75	0.365	K	BRC	17.60	2.00	2.25	3.37	3.02	3.91	.0175414 L 3420.470
400	402-	400	B02	TUB	12.75	0.375	K	CHD	17.60		3.91	7.31	2.86	7.00	.5243030 L 114.4377
400	400-	455	B03	TUB	10.75	0.365	K	BRC	17.60	2.00	2.41	4.26	2.98	4.62	.0587310 L 1021.606
400	402-	400	B02	TUB	12.75	0.375	K	CHD	17.60		4.05	9.00	3.15	8.27	1.660078 L 36.14287
400	401L-	400	B03	TUB	10.75	0.365	K	BRC	17.60	2.00	2.29	3.31	3.02	4.02	.96459-2 L 6220.256
400	402-	400	B02	TUB	12.75	0.375	K	CHD	17.60		4.01	7.11	2.86	7.19	.2866144 L 209.3405
400	481L-	400	B03	TUB	10.75	0.365	K	BRC	17.60	2.00	2.41	4.32	2.98	4.57	.0522371 L 1148.608
400	402-	400	B02	TUB	12.75	0.375	K	CHD	17.60		4.04	9.19	3.15	8.18	1.706714 L 35.15528
400	400-0036	LT3	TUB	TUB	10.38	0.365	K	BRC	17.60	2.00	4.30	4.73	2.96	9.51	12.21319 R 4.912721
400	400-0037	LT3	TUB	TUB	10.38	0.365	K	BRC	17.60	2.00	4.22	4.56	2.96	9.46	11.93634 R 5.026667
481L	481-481L	B01	TUB	TUB	14.00	0.375	K	BRC	50.90	2.00	6.59	5.33	4.62	4.99	.0929584 L 645.4500
481L	481L-0004	LG5	TUB	TUB	34.00	1.655	K	CHD	50.90		8.84	5.90	5.89	6.01	.2127158 TR 282.0665

* * * M E M B E R F A T I G U E R E P O R T * * *															
(DAMAGE ORDER)															
ORIGINAL				CHORD											
REQUIRED	JOINT	MEMBER	GRUP	TYPE	OD	WT	JNT	MEM	LEN.	GAP	* STRESS	CONC.	FACTORS	* FATIGUE	RESULTS
OD	WT														
		ID	ID		(IN)	(IN)	TYP	TYP	(FT)	(IN)	AX-CR	AX-SD	IN-PL	OU-PL	DAMAGE LOC SVC LIFE
(IN)	(IN)														
481L	481L-	419	B02	TUB	12.75	0.375	K	BRC	50.90	2.00	6.33	5.58	4.63	4.47	4.510643 R 13.30187
481L	481L-0004	LG5	TUB	TUB	34.00	1.655	K	CHD	50.90		8.63	6.11	5.85	5.27	8.734677 R 6.869172
481L	481L-	400	B03	TUB	10.75	0.365	Y	BRC	50.90		3.24	6.26	4.53	3.41	.0795924 L 753.8407
481L	481L-0004	LG5	TUB	TUB	34.00	1.655	Y	CHD	50.90		6.91	7.05	5.52	3.84	.1443312 BL 415.7107
481L	481L-389L	JD2	TUB	TUB	18.00	0.375	K	BRC	50.90	2.00	4.12	3.69	3.68	3.77	.41769-2 T 14364.60
481L	381L-481L	LG4	TUB	TUB	34.00	1.655	K	CHD	50.90		7.28	5.27	4.75	4.86	.0617297 T 971.9802
481L	301L-481L	JD7	TUB	TUB	20.00	0.375	K	BRC	50.90	2.00	4.20	3.99	3.71	4.33	.93959-2 T 6385.741
481L	381L-481L	LG4	TUB	TUB	34.00	1.655	K	CHD	50.90		7.72	5.75	4.83	5.76	.1544643 T 388.4392
450	450-499L	B03	TUB	TUB	10.75	0.365	K	BRC	15.70	2.00	2.57	3.65	3.01	3.88	.87240-2 TR 6877.617
450	450-	418	B02	TUB	12.75	0.375	K	CHD	15.70		4.59	8.02	2.93	6.94	.2973174 R 201.8045
450	489L-	450	B03	TUB	10.75	0.365	K	BRC	15.70	2.00	2.29	2.63	3.07	3.20	.63767-3 B 94093.10
450	430-	450	B02	TUB	12.75	0.375	K	CHD	15.70		4.13	5.67	2.56	5.73	.35429-2 BR 16935.06
450	450-	453	B05	TUB	8.62	0.322	K	BRC	15.70	2.00	2.90	4.25	3.19	6.21	.64595-2 T 9288.628
450	450-	418	B02	TUB	12.75	0.375	K	CHD	15.70		4.58	7.99	3.07	9.57	.0604758 L 992.1324

* * * M E M B E R F A T I G U E R E P O R T * * *															
(DAMAGE ORDER)															
ORIGINAL				CHORD											
REQUIRED	JOINT	MEMBER	GRUP	TYPE	OD	WT	JNT	MEM	LEN.	GAP	* STRESS	CONC.	FACTORS	* FATIGUE	RESULTS
OD	WT														
		ID	ID		(IN)	(IN)	TYP	TYP	(FT)	(IN)	AX-CR	AX-SD	IN-PL	OU-PL	DAMAGE LOC SVC LIFE
(IN)	(IN)														
450	456-	450	B05	TUB	8.62	0.322	K	BRC	15.70	2.00	3.66	9.33	3.07	8.79	1.236897 TR 48.50847
450	430-	450	B02	TUB	12.75	0.375	K	CHD	15.70		5.04	15.59	3.98	13.54	6.724837 TR 8.922150
581L	780-581L	A01	TUB	TUB	10.75	0.365	K	BRC	26.72	2.00	6.26	5.72	4.56	3.98	.3417353 L 175.5745
581L	581L-681L	LG6	TUB	TUB	34.00	1.655	K	CHD	26.72		7.94	6.16	5.56	4.48	.5617253 L 106.8138
581L	581L-	753	A01	TUB	10.75	0.365	K	BRC	26.72	2.00	6.11	5.67	4.55	3.85	3.088372 R 19.42771
581L	581L-681L	LG6	TUB	TUB	34.00	1.655	K	CHD	26.72		7.81	6.11	5.55	4.33	4.816192 R 12.45798
581L	581L-0032	JD1	TUB	TUB	18.00	0.375	K	BRC	26.72	2.00	3.02	3.37	3.51	3.15	.6374606 B 94.12347
581L	0003-581L	LG5	TUB	TUB	34.00	1.655	K	CHD	26.72		6.06	4.88	4.50	4.05	2.045666 T 29.33031
581L	0029-581L	JD6	TUB	TUB	20.00	0.375	K	BRC	26.72	2.00	3.67	3.46	3.49	3.66	.9877163 TL 60.74619
581L	0003-581L	LG5	TUB	TUB	34.00	1.655	K	CHD	26.72		6.85	4.98	4.51	4.87	3.330252 TL 18.01665
581L	0038-581L	LT3	TUB	TUB	10.38	0.365	Y	BRC	26.72		2.77	2.60	3.28	1.50	.5576640 B 107.5917
581L	0003-581L	LG5	TUB	TUB	34.00	1.655	Y	CHD	26.72		5.27	3.30	3.86	1.67	1.238461 B 48.44723
686	686-	681	A02	TUB	8.62	0.322	K	BRC	10.69	2.00	2.86	3.65	2.92	5.68	.74384-2 R 8066.230
686	686-	680	A01	TUB	10.75	0.365	K	CHD	10.69		4.61	6.73	2.86	9.40	.0963751 R 622.5671

* * * M E M B E R F A T I G U E R E P O R T * * *															
(DAMAGE ORDER)															
ORIGINAL				CHORD											
REQUIRED	JOINT	MEMBER	GRUP	TYPE	OD	WT	JNT	MEM	LEN.	GAP	* STRESS	CONC.	FACTORS	* FATIGUE	RESULTS
OD	WT														
		ID	ID		(IN)	(IN)	TYP	TYP	(FT)	(IN)	AX-CR	AX-SD	IN-PL	OU-PL	DAMAGE LOC SVC LIFE
(IN)	(IN)														
686	686-0010	A02	TUB	TUB	8.62	0.322	K	BRC	11.14	2.00	2.47	2.45	3.12	2.52	.0131741 TR 4554.396
686	686-	680	A01	TUB	10.75	0.365	K	CHD	11.14		3.88	4.84	2.24	4.18	.2637313 R 227.5043
686	689-	686	A02	TUB	8.62	0.322	K	BRC	10.48	2.00	3.58	6.55	2.77	7.36	.6130375 L 97.87329
686	686-	680	A01	TUB	10.75	0.365	K	CHD	10.48		5.30	10.96	3.55	12.18	4.575955 L 13.11202
686	589L-	686	A02	TUB	8.62	0.322	K	BRC	11.56	2.00	2.17	1.93	3.24	2.04	.41391-3 R 144960.6
686	710-	686	A01	TUB	10.75	0.365	K	CHD	11.56		3.36	3.57	1.95	3.38	.53351-2 R 11246.29
589L	605-589L	A01	TUB	TUB	10.75	0.365	K	BRC	26.46	2.00	6.37	5.71	4.56	4.00	.4483938 B 133.8110
589L	589L-689L	LG6	TUB	TUB	34.00	1.655	K	CHD	26.46		8.01	6.12	5.56	4.51	.8195221 B 73.21340
589L	645-589L	A01	TUB	TUB	10.75	0.365	T	BRC	26.46		2.59	6.28	4.59	3.44	.0142538 R 4209.417
589L	0007-589L	LG5	TUB	TUB	34.00	1.655	T	CHD	26.46		5.11	7.68	5.59	3.87	.0295752 R 2028.729
589L	589L-599L	A01	TUB	TUB	10.75	0.365	T	BRC	26.46		2.59	6.27	4.59	3.44	.31632-2 L 18968.22
589L	0007-589L	LG5	TUB	TUB	34.00	1.655	T	CHD	26.46		5.14	7.65	5.59	3.87	.69863-2 L 8588.251
589L	604-589L	A02	TUB	TUB	8.62	0.322	T	BRC	26.46		3.18	5.46	4.23	2.76	.53641-2 BR 11185.38
589L	589L-689L	LG6	TUB	TUB	34.00	1.655	T	CHD	26.46		5.05	5.66	4.67	2.81	.0158876 B 3776.537

* * * M E M B E R F A T I G U E R E P O R T * * *																	
(DAMAGE ORDER)																	
ORIGINAL				CHORD													
REQUIRED	JOINT	MEMBER	GRUP	TYPE	OD	WT	JNT	MEM	LEN.	GAP	* STRESS	CONC.	FACTORS	*	FATIGUE RESULTS		
OD	WT				OD	WT	JNT	MEM	LEN.	GAP	* STRESS	CONC.	FACTORS	*	DAMAGE	LOC	SVC LIFE
(IN)	(IN)	ID	ID		(IN)	(IN)	TYP	TYP	(FT)	(IN)	AX-CR	AX-SD	IN-PL	OU-PL			
589L	589L-	686	A02	TUB	8.62	0.322	T	BRC	26.46		3.18	5.47	4.24	2.77	.48299-2	T	12422.74
589L	589L-689L	LG6	TUB	34.00	1.655	T	CHD	26.46			5.06	5.67	4.68	2.82	.0144764	T	4144.675
589L	0034-589L	JD6	TUB	20.00	0.375	K	BRC	26.46		2.00	3.53	3.51	3.50	3.65	1.138324	R	52.70908
589L	0007-589L	LG5	TUB	34.00	1.655	K	CHD	26.46			6.73	5.08	4.52	4.86	3.752121	TL	15.99095
599L	620-599L	A01	TUB	10.75	0.365	K	BRC	26.72		2.00	6.84	5.67	4.56	4.06	.2385186	T	251.5527
599L	599L-699L	LG6	TUB	34.00	1.655	K	CHD	26.72			8.33	6.01	5.56	4.57	.4049571	T	148.1638
599L	589L-599L	A01	TUB	10.75	0.365	K	BRC	26.72		2.00	6.13	5.67	4.55	3.85	.94984-2	T	6316.877
599L	599L-699L	LG6	TUB	34.00	1.655	K	CHD	26.72			7.82	6.11	5.55	4.33	.0259071	T	2315.967
599L	0031-599L	JD1	TUB	18.00	0.375	K	BRC	26.72		2.00	3.03	3.37	3.50	3.15	.7327302	B	81.88553
599L	0010-599L	LG5	TUB	34.00	1.655	K	CHD	26.72			6.07	4.87	4.50	4.05	2.256961	B	26.58442
599L	0030-599L	JD6	TUB	20.00	0.375	K	BRC	26.72		2.00	3.46	3.50	3.49	3.61	1.131317	BR	53.03551
599L	0010-599L	LG5	TUB	34.00	1.655	K	CHD	26.72			6.67	5.08	4.51	4.80	3.652423	R	16.42745
489L	452-489L	B01	TUB	14.00	0.375	K	BRC	50.39		2.00	6.83	5.22	4.62	5.05	.9559810	T	62.76275
489L	489L-0005	LG5	TUB	34.00	1.655	K	CHD	50.39			8.92	5.75	5.89	6.08	2.320093	T	25.86104

* * * M E M B E R F A T I G U E R E P O R T * * *																
(DAMAGE ORDER)																
ORIGINAL				CHORD												
REQUIRED	JOINT	MEMBER	GRUP	TYPE	OD	WT	JNT	MEM	LEN.	GAP	* STRESS	CONC.	FACTORS	FATIGUE RESULTS		
OD	WT															
(IN)	(IN)	ID	ID		(IN)	(IN)	TYP	TYP	(FT)	(IN)	AX-CR	AX-SD	IN-PL	OU-PL	DAMAGE	LOC
																SVC LIFE
489L	A35-489L	B02	TUB	12.75	0.375	K	BRC	50.39	2.00	5.97	6.12	4.66	4.20	1.721381	R	34.85573
489L	389L-489L	LG4	TUB	34.00	1.655	K	CHD	50.39		8.13	7.18	5.89	4.96	3.458485	R	17.34864
489L	489L-499L	B02	TUB	12.75	0.375	K	BRC	50.39	2.00	6.12	6.08	4.66	4.22	.0142339	TR	4215.293
489L	389L-489L	LG4	TUB	34.00	1.655	K	CHD	50.39		8.23	7.11	5.89	4.98	.0559562	T	1072.267
489L	454-489L	B03	TUB	10.75	0.365	Y	BRC	50.39		3.23	6.41	4.57	3.49	.21481-2	R	27931.95
489L	489L-0005	LG5	TUB	34.00	1.655	Y	CHD	50.39		6.91	7.13	5.57	3.92	.37288-2	R	16091.00
489L	489L- 450	B03	TUB	10.75	0.365	T	BRC	50.39		3.23	6.43	4.58	3.50	.28199-2	L	21277.46
489L	489L-0005	LG5	TUB	34.00	1.655	T	CHD	50.39		6.92	7.15	5.58	3.94	.77564-2	T	7735.526
489L	0025-489L	JD1	TUB	18.00	0.375	K	BRC	50.39	2.00	3.28	2.74	3.21	2.87	.1106208	T	542.3936
489L	489L-0005	LG5	TUB	34.00	1.655	K	CHD	50.39		5.82	4.06	4.01	3.69	.4117453	T	145.7212
489L	489L-0024	JD1	TUB	18.00	0.375	K	BRC	50.39	2.00	3.19	2.75	3.21	2.83	.1115863	T	537.7003
489L	489L-0005	LG5	TUB	34.00	1.655	K	CHD	50.39		5.70	4.10	4.01	3.64	.3994948	T	150.1897
489L	309L-489L	JD7	TUB	20.00	0.375	K	BRC	50.39	2.00	4.49	3.84	3.72	4.47	.0472480	T	1269.894
489L	389L-489L	LG4	TUB	34.00	1.655	K	CHD	50.39		7.77	5.39	4.84	5.95	.4012476	T	149.5336
669	669- 672	A01	TUB	10.75	0.365	K	BRC	4.82	2.00	2.17	1.87	2.77	1.71	.31301-4	BL	1916881.

* * * M E M B E R F A T I G U E R E P O R T * * *																	
(DAMAGE ORDER)																	
ORIGINAL				CHORD													
REQUIRED	JOINT	MEMBER	GRUP	TYPE	OD	WT	JNT	MEM	LEN.	GAP	* STRESS	CONC.	FACTORS	*	FATIGUE RESULTS		
OD	WT																
(IN)	(IN)	ID	ID		(IN)	(IN)	TYP	TYP	(FT)	(IN)	AX-CR	AX-SD	IN-PL	OU-PL	DAMAGE	LOC	SVC LIFE
669	669- 729	A01	TUB	10.75	0.365	K	CHD	4.82		2.00	3.97	3.00	2.41	3.27	.42945-3	BL	139714.9
669	673- 669	A01	TUB	10.75	0.365	K	BRC	4.67			2.27	2.12	2.72	2.10	.17129-3	R	350275.8
669	670- 669	A01	TUB	10.75	0.365	K	CHD	4.67			4.18	3.58	2.59	4.01	.26868-2	R	22331.14
669	669- 655	A02	TUB	8.62	0.322	T	BRC	4.31			2.19	8.90	2.77	6.29	.2426773	R	247.2419
669	669- 729	A01	TUB	10.75	0.365	T	CHD	4.31			2.63	15.46	3.55	10.41	2.829143	R	21.20784
604	604-589L	A02	TUB	8.62	0.322	TK	BRC	4.82	4.00		2.39	3.06	3.03	3.33	.21260-2	R	28221.86
604	604- 726	A01	TUB	10.75	0.365	TK	CHD	4.82			3.83	6.05	2.49	5.50	.0424491	R	1413.456
604	607- 604	A02	TUB	8.62	0.322	K	BRC	4.31	2.00		3.44	6.91	2.77	6.56	.2629490	R	228.1812
604	603- 604	A01	TUB	10.75	0.365	K	CHD	4.31			4.94	11.77	3.55	10.86	2.644568	R	22.68802
604	648- 604	A02	TUB	8.62	0.322	K	BRC	4.85	2.00		2.37	2.82	3.04	4.09	.0312061	L	1922.701
604	603- 604	A01	TUB	10.75	0.365	K	CHD	4.85			3.90	5.42	2.46	6.77	.3988882	L	150.4181
604	A220- 604	A02	TUB	8.62	0.322	TK	BRC	6.13	4.00		2.00	1.74	3.32	2.32	.44832-3	T	133832.0
604	603- 604	A01	TUB	10.75	0.365	TK	CHD	6.13			3.36	3.03	1.77	3.84	.50521-2	T	11876.37
604	604- 646	A05	TUB	6.62	0.375	TK	BRC	4.31	4.00		5.68	8.77	3.12	7.60	.2729374	L	219.8306

* * * M E M B E R F A T I G U E R E P O R T * * *																	
(DAMAGE ORDER)																	
ORIGINAL				CHORD													
REQUIRED	JOINT	MEMBER	GRUP	TYPE	OD	WT	JNT	MEM	LEN.	GAP	* STRESS	CONC.	FACTORS	*	FATIGUE RESULTS		
OD	WT				OD	WT	JNT	MEM	LEN.	GAP	* STRESS	CONC.	FACTORS	*	FATIGUE RESULTS		
(IN)	(IN)	ID	ID		(IN)	(IN)	TYP	TYP	(FT)	(IN)	AX-CR	AX-SD	IN-PL	OU-PL	DAMAGE	LOC	SVC LIFE
604	603-	604	A01	TUB	10.75	0.365	TK	CHD	4.31		8.47	14.54	4.36	12.38	2.798574	L	21.43949
501L	501L-	691	A01	TUB	10.75	0.365	Y	BRC	26.72		2.69	6.05	4.56	3.47	.6591831	R	91.02175
501L	501L-601L	LG6		TUB	34.00	1.655	Y	CHD	26.72		5.56	7.09	5.56	3.90	1.214258	R	49.41290
501L	501L-	698	A01	TUB	10.75	0.365	K	BRC	26.72	2.00	5.93	5.69	4.55	3.83	.0282117	TR	2126.774
501L	501L-601L	LG6		TUB	34.00	1.655	K	CHD	26.72		7.69	6.16	5.55	4.31	.0526168	TR	1140.320
501L	501L-0033	JD1		TUB	18.00	0.375	K	BRC	26.72	2.00	2.99	3.37	3.50	3.14	.8079787	B	74.25938
501L	0001-501L	LG5		TUB	34.00	1.655	K	CHD	26.72		6.04	4.89	4.50	4.03	2.475485	B	24.23767
501L	0039-501L	LT3		TUB	10.38	0.365	Y	BRC	26.72		2.77	2.60	3.28	1.50	.6544688	T	91.67740
501L	0001-501L	LG5		TUB	34.00	1.655	Y	CHD	26.72		5.27	3.29	3.85	1.67	1.479781	T	40.54655
519L	762-519L	A01		TUB	10.75	0.365	K	BRC	26.72	2.00	5.90	5.69	4.55	3.82	.80072-2	TR	7493.247
519L	519L-619L	LG6		TUB	34.00	1.655	K	CHD	26.72		7.67	6.17	5.55	4.30	.0184173	T	3257.809
519L	519L-	758	A01	TUB	10.75	0.365	Y	BRC	26.72		2.69	6.05	4.56	3.47	.0203300	L	2951.309
519L	519L-619L	LG6		TUB	34.00	1.655	Y	CHD	26.72		5.56	7.09	5.56	3.90	.0462401	B	1297.574
519L	0028-519L	JD1		TUB	18.00	0.375	K	BRC	26.72	2.00	3.03	3.37	3.50	3.15	.7222726	T	83.07112

* * * MEMBER FATIGUE REPORT * * *																
(DAMAGE ORDER)																
ORIGINAL				CHORD												
REQUIRED	JOINT	MEMBER	GRUP	TYPE	OD	WT	JNT	MEM	LEN.	GAP	* STRESS	CONC.	FACTORS	* FATIGUE	RESULTS	
OD	WT															
(IN)	(IN)	ID	ID		(IN)	(IN)	TYP	TYP	(FT)	(IN)	AX-CR	AX-SD	IN-PL	OU-PL	DAMAGE	LOC
519L	0100-519L	LG5	TUB		34.00	1.655	K	CHD	26.72		6.07	4.87	4.50	4.05	2.357301	T
401	405-	401 B02	TUB		12.75	0.375	TK	BRC	18.51	4.00	3.80	4.15	2.61	5.49	.26026-3	B
401	433-	401 B02	TUB		12.75	0.375	TK	CHD	18.51		7.20	7.66	3.58	10.54	.17047-2	B
401	401-419L	B03	TUB		10.75	0.365	TK	BRC	18.47	4.00	2.85	3.47	3.01	4.16	.29604-2	T
401	401-	490 B02	TUB		12.75	0.375	TK	CHD	18.47		5.24	7.48	2.93	7.44	.0685999	L
401	409L-	401 B03	TUB		10.75	0.365	TK	BRC	18.43	4.00	2.52	2.61	3.07	3.37	.20099-3	T
401	433-	401 B02	TUB		12.75	0.375	TK	CHD	18.43		4.65	5.59	2.56	6.03	.26785-2	TL
401	401-	459 B05	TUB		8.62	0.322	T	BRC	18.51		2.85	12.19	3.07	8.43	.2576898	TL
401	401-	490 B02	TUB		12.75	0.375	T	CHD	18.51		4.93	20.04	3.98	12.99	1.898264	L
678	644-	678 A01	TUB		10.75	0.365	TK	BRC	9.33	4.00	2.13	1.52	2.95	1.35	.74071-4	T
678	713-	678 A01	TUB		10.75	0.365	TK	CHD	9.33		4.03	2.20	1.88	2.57	.96707-3	L
678	678-	685 A01	TUB		10.75	0.365	TK	BRC	8.19	4.00	3.42	3.68	2.56	3.95	.83246-4	TL
678	678-	757 A01	TUB		10.75	0.365	TK	CHD	8.19		6.26	6.73	3.32	7.52	.99014-3	TL
678	678-0100	A01	TUB		10.75	0.365	TK	BRC	8.88	4.00	2.36	1.74	2.85	1.59	.54875-3	T

* * * MEMBER FATIGUE REPORT * * *																
(DAMAGE ORDER)																
ORIGINAL				CHORD												
REQUIRED	JOINT	MEMBER	GRUP	TYPE	OD	WT	JNT	MEM	LEN.	GAP	* STRESS	CONC.	FACTORS	* FATIGUE	RESULTS	
OD	WT															
(IN)	(IN)	ID	ID		(IN)	(IN)	TYP	TYP	(FT)	(IN)	AX-CR	AX-SD	IN-PL	OU-PL	DAMAGE	LOC
678	678-	757 A01	TUB		10.75	0.365	TK	CHD	8.88		4.52	2.72	2.16	3.04	.0124561	T
678	678-	679 A02	TUB		8.62	0.322	T	BRC	8.17		2.48	9.00	2.77	6.64	.1670486	R
678	678-	757 A01	TUB		10.75	0.365	T	CHD	8.17		3.51	15.28	3.55	10.99	1.629001	R
401L	401L-	403 B01	TUB		14.00	0.375	K	BRC	50.90	2.00	6.01	6.00	4.62	4.45	.4246989	R
401L	401L-0009	LG5	TUB		34.00	1.655	K	CHD	50.90		9.04	6.82	5.89	5.35	1.002782	R
401L	401L-	402 B02	TUB		12.75	0.375	K	BRC	50.90	2.00	7.19	5.30	4.63	4.60	.0491701	T
401L	401L-0009	LG5	TUB		34.00	1.655	K	CHD	50.90		8.99	5.68	5.85	5.42	.1058331	T
401L	401L-	400 B03	TUB		10.75	0.365	Y	BRC	50.90		3.24	6.26	4.53	3.41	.0124908	BL
401L	401L-0009	LG5	TUB		34.00	1.655	Y	CHD	50.90		6.91	7.05	5.52	3.84	.0730168	B
401L	401L-309L	JD2	TUB		18.00	0.375	K	BRC	50.90	2.00	4.04	3.72	3.68	3.74	.94157-2	T
401L	301L-401L	LG4	TUB		34.00	1.655	K	CHD	50.90		7.27	5.36	4.75	4.81	.1288446	T
401L	401L-0023	JD6	TUB		20.00	0.375	K	BRC	50.90	2.00	3.26	2.49	2.99	2.86	.1363444	T
401L	401L-0009	LG5	TUB		34.00	1.655	K	CHD	50.90		6.14	3.81	3.69	3.80	.4985745	T
409L	409L-	451 B01	TUB		14.00	0.375	K	BRC	50.39	2.00	6.51	5.85	4.62	4.48	.0560861	BL

* * * MEMBER FATIGUE REPORT * * *																
(DAMAGE ORDER)																
ORIGINAL				CHORD												
REQUIRED	JOINT	MEMBER	GRUP	TYPE	OD	WT	JNT	MEM	LEN.	GAP	* STRESS	CONC.	FACTORS	* FATIGUE	RESULTS	
OD	WT															
(IN)	(IN)	ID	ID		(IN)	(IN)	TYP	TYP	(FT)	(IN)	AX-CR	AX-SD	IN-PL	OU-PL	DAMAGE	LOC
409L	409L-0020	LG5	TUB		34.00	1.655	K	CHD	50.39		9.29	6.62	5.89	5.40	.1998153	BL
409L	402-409L	B02	TUB		12.75	0.375	K	BRC	50.39	2.00	6.71	5.92	4.66	4.27	.0360465	T
409L	309L-409L	LG4	TUB		34.00	1.655	K	CHD	50.39		8.71	6.76	5.89	5.04	.1198291	T
409L	409L-	495 B02	TUB		12.75	0.375	K	BRC	50.39	2.00	6.46	5.99	4.66	4.25	.0310271	T
409L	309L-409L	LG4	TUB		34.00	1.655	K	CHD	50.39		8.56	6.87	5.89	5.02	.1097018	T
409L	455-409L	B03	TUB		10.75	0.365	Y	BRC	50.39		3.23	6.41	4.57	3.49	.0201725	R
409L	409L-0020	LG5	TUB		34.00	1.655	Y	CHD	50.39		6.91	7.13	5.57	3.92	.0435589	B
409L	409L-	401 B03	TUB		10.75	0.365	T	BRC	50.39		3.23	6.43	4.58	3.50	.64669-2	L
409L	409L-0020	LG5	TUB		34.00	1.655	T	CHD	50.39		6.92	7.15	5.58	3.94	.0138217	T
409L	0027-409L	JD1	TUB		18.00	0.375	K	BRC	50.39	2.00	3.32	2.73	3.21	2.88	.1029744	T
409L	409L-0020	LG5	TUB		34.00	1.655	K	CHD	50.39		5.90	4.04	4.01	3.71	.3842792	T
409L	409L-0026	JD1	TUB		18.00	0.375	K	BRC	50.39	2.00	3.33	2.74	3.21	2.87	.1087729	T
409L	409L-0020	LG5	TUB		34.00	1.655	K	CHD	50.39		5.93	4.05	4.01	3.70	.4039925	BR
409L	409L-0035	JD6	TUB		20.00	0.375	K	BRC	50.39	2.00	3.18	2.54	3.00	2.74	.1256354	B
409L	409L-0020	LG5	TUB		34.00	1.655	K	CHD	50.39		6.19	3.99	3.70	3.64	.5984020	B

* * * MEMBER FATIGUE REPORT * * *																
(DAMAGE ORDER)																
ORIGINAL				CHORD												
REQUIRED	JOINT	MEMBER	GRUP	TYPE	OD	WT	JNT	MEM	LEN.	GAP	* STRESS	CONC.	FACTORS	* FATIGUE	RESULTS	
OD	WT															
(IN)	(IN)	ID	ID		(IN)	(IN)	TYP	TYP	(FT)	(IN)	AX-CR	AX-SD	IN-PL	OU-PL	DAMAGE	LOC
451	451-	411 B02	TUB		12.75	0.375	T	BRC	17.10		2.50	8.48	2.85	6.33	.0296845	T
451	451-	460 B01	TUB		14.00	0.375	T	CHD	17.10		4.75	15.73	4.02	11.88	.1982902	TR
451	473-	451 B03	TUB		10.75	0.365	T	BRC	17.10		2.51	12.69	3.13	9.09	.0257514	L
451	451-	460 B01	TUB		14.00	0.375	T	CHD	17.10		4.69	23.25	4.41	15.78	.5779802	L
-----																
419L	419L-	453 B01	TUB		14.00	0.375	K	BRC	50.90	2.00	6.26	5.93	4.62	4.46	.0648805	B
419L	419L-0021	LG5	TUB		34.00	1.655	K	CHD	50.90		9.18	6.73	5.89	5.38	.2628615	B
419L	496-419L	B02	TUB		12.75	0.375	K	BRC	50.90	2.00	6.96	5.38	4.63	4.56	.0465285	T
419L	419L-0021	LG5	TUB		34.00	1.655	K	CHD	50.90		8.89	5.80	5.85	5.38	.1054489	T
419L	401-419L	B03	TUB		10.75	0.365	Y	BRC	50.90		3.24	6.25	4.53	3.41	.0247119	R
419L	419L-0021	LG5	TUB		34.00	1.655	Y	CHD	50.90		6.91	7.04	5.52	3.84	.0771707	BR
419L	309L-419L	JD2	TUB		18.00	0.375	K	BRC	50.90	2.00	4.09	3.70	3.68	3.76	.76913-2	T
419L	319L-419L	LG4	TUB		34.00	1.655	K	CHD	50.90		7.28	5.31	4.75	4.84	.1068221	T
419L	419L-0022	JD6	TUB		20.00	0.375	K	BRC	50.90	2.00	3.24	2.49	2.99	2.83	.1247508	T
419L	419L-0021	LG5	TUB		34.00	1.655	K	CHD	50.90		6.15	3.84	3.69	3.76	.5306888	T



* * * M E M B E R F A T I G U E R E P O R T * * *																
(DAMAGE ORDER)																
ORIGINAL				CHORD												
REQUIRED	MEMBER	GRUP	TYPE	OD	WT	JNT	MEM	LEN.	GAP	* STRESS	CONC.	FACTORS	FATIGUE RESULTS			
JOINT	WT			OD												
OD		ID	ID	(IN)	(IN)	TYP	TYP	(FT)	(IN)	AX-CR	AX-SD	IN-PL	OU-PL	DAMAGE	LOC	
(IN)	(IN)														SVC LIFE	
499L	4A-499L	B01	TUB	14.00	0.375	K	BRC	50.90	2.00	6.64	5.31	4.62	5.00	.1992953	T	301.0608
499L	499L-0006	LG5	TUB	34.00	1.655	K	CHD	50.90		8.86	5.87	5.89	6.02	.4957269	T	121.0344
499L	489L-499L	B02	TUB	12.75	0.375	K	BRC	50.90	2.00	6.55	5.51	4.63	4.50	.0372056	T	1612.661
499L	499L-0006	LG5	TUB	34.00	1.655	K	CHD	50.90		8.72	6.01	5.85	5.31	.0897473	T	668.5438
499L	450-499L	B03	TUB	10.75	0.365	Y	BRC	50.90		3.24	6.25	4.53	3.41	.0739952	L	810.8634
499L	499L-0006	LG5	TUB	34.00	1.655	Y	CHD	50.90		6.91	7.04	5.52	3.84	.1728128	BL	347.1966
499L	389L-499L	JD2	TUB	18.00	0.375	K	BRC	50.90	2.00	4.09	3.70	3.68	3.76	.49063-2	T	12229.15
499L	399L-499L	LG4	TUB	34.00	1.655	K	CHD	50.90		7.28	5.31	4.75	4.84	.0640061	T	937.4099
499L	319L-499L	JD7	TUB	20.00	0.375	K	BRC	50.90	2.00	4.35	3.89	3.71	4.40	.0188627	T	3180.877
499L	399L-499L	LG4	TUB	34.00	1.655	K	CHD	50.90		7.75	5.54	4.83	5.85	.2055239	T	291.9369
452	452- 407	B02	TUB	12.75	0.375	T	BRC	17.10		2.56	8.46	2.85	6.39	.0850600	B	705.3848
452	452-489L	B01	TUB	14.00	0.375	T	CHD	17.10		4.95	15.63	4.02	11.98	.4633135	B	129.5019
452	470- 452	B03	TUB	10.75	0.365	T	BRC	17.10		2.50	12.71	3.13	9.08	.0291384	B	2059.140
452	452-489L	B01	TUB	14.00	0.375	T	CHD	17.10		4.64	23.31	4.41	15.77	.2747939	BL	218.3455

* * * M E M B E R F A T I G U E R E P O R T * * *																	
(DAMAGE ORDER)																	
ORIGINAL				CHORD													
REQUIRED	MEMBER	GRUP	TYPE	OD	WT	JNT	MEM	LEN.	GAP	* STRESS	CONC.	FACTORS	*	FATIGUE RESULTS			
JOINT	WT																
OD		ID	ID	(IN)	(IN)	TYP	TYP	(FT)	(IN)	AX-CR	AX-SD	IN-PL	OU-PL	DAMAGE	LOC	SVC LIFE	
(IN)	(IN)																
337	314-	337	CB4	TUB	10.75	0.375	T	BRC	62.80		7.92	17.90	3.88	12.99	.0430775	TR	1392.839
337	333-	337	CB1	TUB	18.00	0.375	T	CHD	62.80		20.74	26.21	5.72	21.16	.4179917	TR	143.5435
509L	672-	509L	A01	TUB	10.75	0.365	T	BRC	26.46		2.69	6.10	4.58	3.50	.0104194	L	5758.517
509L	509L-	609L	LG6	TUB	34.00	1.655	T	CHD	26.46		5.55	7.13	5.58	3.93	.0299954	BL	2000.305
509L	698-	509L	A01	TUB	10.75	0.365	T	BRC	26.46		2.58	6.29	4.59	3.43	.86166-2	L	6963.325
509L	0008-	509L	LG5	TUB	34.00	1.655	T	CHD	26.46		5.08	7.72	5.59	3.86	.0264071	BL	2272.112
509L	509L-	661	A01	TUB	10.75	0.365	T	BRC	26.46		2.69	6.12	4.58	3.50	.0112816	R	5318.412
509L	509L-	609L	LG6	TUB	34.00	1.655	T	CHD	26.46		5.55	7.15	5.58	3.94	.0362118	TR	1656.919
509L	509L-	677	A01	TUB	10.75	0.365	Y	BRC	26.46		2.69	6.04	4.56	3.47	.1119032	TL	536.1775
509L	509L-	609L	LG6	TUB	34.00	1.655	Y	CHD	26.46		5.55	7.09	5.56	3.90	.3671894	TL	163.4034
509L	509L-	0056	A01	TUB	10.75	0.365	T	BRC	26.46		2.59	6.28	4.59	3.43	.23947-2	R	25055.10
509L	0008-	509L	LG5	TUB	34.00	1.655	T	CHD	26.46		5.10	7.70	5.59	3.86	.88067-2	T	6812.960
336	300-	336	CB4	TUB	10.75	0.375	T	BRC	62.80		7.92	17.90	3.88	12.99	.0365237	TL	1642.771
336	336-	389L	CB1	TUB	18.00	0.375	T	CHD	62.80		20.74	26.21	5.72	21.16	.3523261	TL	170.2968

* * * M E M B E R F A T I G U E R E P O R T * * *																
(DAMAGE ORDER)																
ORIGINAL				CHORD												
REQUIRED	MEMBER	GRUP	TYPE	OD	WT	JNT	MEM	LEN.	GAP	* STRESS	CONC.	FACTORS	*	FATIGUE RESULTS		
JOINT	WT															
OD		ID	ID	(IN)	(IN)	TYP	TYP	(FT)	(IN)	AX-CR	AX-SD	IN-PL	OU-PL	DAMAGE	LOC	SVC LIFE
(IN)	(IN)															
690	690- 671	A01	TUB	10.75	0.365	TK	BRC	14.09	4.00	3.86	3.76	2.54	6.11	.42709-3	R	140486.7
690	690- 601	A01	TUB	10.75	0.365	TK	CHD	14.09		7.35	6.77	3.43	11.65	.0104038	R	5767.140
690	690- 696	A01	TUB	10.75	0.365	TK	BRC	14.16	4.00	3.20	2.98	2.63	4.46	.49487-3	L	121244.4
690	701- 690	A01	TUB	10.75	0.365	TK	CHD	14.16		6.29	5.59	2.96	8.51	.0127948	L	4689.408
690	690- 659	A02	TUB	8.62	0.322	TK	BRC	14.17	4.00	3.62	3.71	2.87	5.93	.0240824	L	2491.444
690	690- 601	A01	TUB	10.75	0.365	TK	CHD	14.17		6.25	6.40	3.06	9.81	.3042131	L	197.2302
0010	686-0010	A02	TUB	8.62	0.322	Y	BRC	50.90		3.58	5.36	4.13	2.60	.0579001	BL	1036.268
0010	0010-599L	LG5	TUB	34.00	1.655	Y	CHD	50.90		5.98	5.42	4.55	2.64	.2513318	B	238.7282
0003	0003-A220	A02	TUB	8.62	0.322	Y	BRC	50.90		3.58	5.41	4.14	2.62	.0561446	BL	1068.670
0003	0003-581L	LG5	TUB	34.00	1.655	Y	CHD	50.90		5.99	5.46	4.57	2.67	.1994276	B	300.8611
309L	309L- 333	CB1	TUB	18.00	0.375	TK	BRC	52.40	4.00	6.21	4.94	4.38	5.25	.32473-2	B	18477.10
309L	309L-409L	LG4	TUB	34.00	1.655	TK	CHD	52.40		9.12	5.85	5.71	6.76	.0135455	B	4429.531
309L	301-309L	CB2	TUB	16.00	0.375	K	BRC	52.40	2.00	6.85	5.04	4.55	5.04	.0263825	T	2274.239

* * * M E M B E R F A T I G U E R E P O R T * * *																
(DAMAGE ORDER)																
ORIGINAL				CHORD												
REQUIRED	MEMBER	GRUP	TYPE	OD	WT	JNT	MEM	LEN.	GAP	* STRESS	CONC.	FACTORS	*	FATIGUE RESULTS		
JOINT	WT															
OD		ID	ID	(IN)	(IN)	TYP	TYP	(FT)	(IN)	AX-CR	AX-SD	IN-PL	OU-PL	DAMAGE	LOC	
(IN)	(IN)														SVC LIFE	
309L	209L-309L	LG3	TUB	34.00	1.655	K	CHD	52.40		8.89	5.91	5.88	6.27	.0820016	T	731.6929
309L	309L- 311	CB2	TUB	16.00	0.375	K	BRC	52.40	2.00	6.63	5.16	4.55	5.01	.0320449	T	1872.374
309L	209L-309L	LG3	TUB	34.00	1.655	K	CHD	52.40		8.74	6.10	5.88	6.24	.1002273	T	598.6393
309L	309L- 352	CB2	TUB	16.00	0.375	T	BRC	52.40		2.85	7.03	4.54	4.62	.15622-4	R	3840618.
309L	309L-409L	LG4	TUB	34.00	1.655	T	CHD	52.40		7.77	8.25	5.87	5.75	.77790-4	B	771304.9
309L	338-309L	CB3	TUB	12.00	0.375	Y	BRC	52.40		3.13	6.68	4.65	3.83	.37331-3	BR	160725.8
309L	309L-409L	LG4	TUB	34.00	1.655	Y	CHD	52.40		7.31	7.66	5.83	4.46	.24491-2	B	24499.22
309L	309L-419L	JD2	TUB	18.00	0.375	K	BRC	52.40	2.00	3.73	2.90	3.39	3.57	.50540-2	T	11871.85
309L	309L-409L	LG4	TUB	34.00	1.655	K	CHD	52.40		6.16	4.06	4.32	4.60	.0467983	T	1282.098
309L	401L-309L	JD2	TUB	18.00	0.375	K	BRC	52.40	2.00	3.77	2.88	3.39	3.60	.51466-2	T	11658.20
309L	309L-409L	LG4	TUB	34.00	1.655	K	CHD	52.40		6.16	4.00	4.32	4.64	.0495405	T	1211.130
309L	309L-489L	JD7	TUB	20.00	0.375	TK	BRC	52.40	4.00	3.69	2.90	3.26	3.20	.0143665	T	4176.375
309L	309L-409L	LG4	TUB	34.00	1.655	TK	CHD	52.40		6.66	4.34	4.15	4.26	.1990531	T	301.4271
309L	299-309L	JD8	TUB	18.00	0.375	TK	BRC	52.40	4.00	3.75	2.62	3.23	2.67	.70584-3	T	85004.52
309L	209L-309L	LG3	TUB	34.00	1.655	TK	CHD	52.40		6.22	3.59	4.04	3.44	.71882-2	T	8347.058

ORIGINAL	CHORD
1	1
2	2
3	3
4	4
5	5
6	6
7	7
8	8
9	9
10	10
11	11
12	12
13	13
14	14
15	15
16	16
17	17
18	18
19	19
20	20
21	21
22	22
23	23
24	24
25	25
26	26
27	27
28	28
29	29
30	30
31	31
32	32
33	33
34	34
35	35
36	36
37	37
38	38
39	39
40	40
41	41
42	42
43	43
44	44
45	45
46	46
47	47
48	48
49	49
50	50
51	51
52	52
53	53
54	54
55	55
56	56
57	57
58	58
59	59
60	60
61	61
62	62
63	63
64	64
65	65
66	66
67	67
68	68
69	69
70	70
71	71
72	72
73	73
74	74
75	75
76	76
77	77
78	78
79	79
80	80
81	81
82	82
83	83
84	84
85	85
86	86
87	87
88	88
89	89
90	90
91	91
92	92
93	93
94	94
95	95
96	96
97	97
98	98
99	99
100	100

\* \* \* MEMBER FATIGUE REPORT \* \* \*

(DAMAGE ORDER)

\* \* \* MEMBER FATIGUE REPORT \* \* \*

(DAMAGE ORDER)

\* \* \* MEMBER FATIGUE REPORT \* \* \*

(DAMAGE ORDER)

				ORIGINAL				CHORD											
REQUIRED	JOINT	MEMBER	GRUP	TYPE	OD	WT	JNT	MEM	LEN.	GAP	* STRESS	CONC.	FACTORS	*	FATIGUE RESULTS				
	OD	WT																	
(IN)	(IN)	ID	ID		(IN)	(IN)	TYP	TYP	(FT)	(IN)	AX-CR	AX-SD	IN-PL	OU-PL	DAMAGE	LOC	SVC LIFE		
605	605-	662	A01	TUB	10.75	0.365	T	CHD	2.19		2.86	4.41	3.43	2.61	.45581-2	TL	13163.42		
0100	678-0100	A01	TUB		10.75	0.365	Y	BRC	50.90		3.24	5.99	4.46	3.29	.0278673	L	2153.065		
0100	0100-519L	LG5	TUB		34.00	1.655	Y	CHD	50.90		6.86	6.89	5.43	3.70	.0735903	BL	815.3253		
381L	353-381L	CB1	TUB		18.00	0.375	K	BRC	52.93	2.00	5.74	5.22	4.38	5.06	.54026-3	T	111057.9		
381L	381L-481L	LG4	TUB		34.00	1.655	K	CHD	52.93		8.97	6.19	5.71	6.51	.23720-2	T	25294.71		
381L	381L- 323	CB3	TUB		12.00	0.375	Y	BRC	52.93		3.15	6.53	4.61	3.75	.26575-3	L	252777.8		
381L	381L-481L	LG4	TUB		34.00	1.655	Y	CHD	52.93		7.32	7.58	5.78	4.37	.12359-2	T	48547.51		
381L	381L- 307	CB6	TUB		14.00	0.375	K	BRC	52.93	2.00	6.87	5.27	4.61	4.95	.0278172	T	2156.937		
381L	381L-481L	LG4	TUB		34.00	1.655	K	CHD	52.93		9.04	5.81	5.88	5.96	.10711638	T	843.1256		
381L	381L-289L	JD3	TUB		20.00	0.375	K	BRC	52.93	2.00	4.46	3.52	3.61	4.28	.15205-2	T	39460.96		
381L	281L-381L	LG3	TUB		34.00	1.655	K	CHD	52.93		7.60	5.00	4.68	5.69	.0160574	T	3736.603		
381L	201-381L	JD8	TUB		18.00	0.375	K	BRC	52.93	2.00	3.31	2.69	3.22	3.06	.30728-3	T	195262.8		
381L	281L-381L	LG3	TUB		34.00	1.655	K	CHD	52.93		6.03	3.98	4.02	3.94	.52146-2	T	11506.22		
609	609- 665	A01	TUB		10.75	0.365	T	BRC	13.92		2.71	3.62	2.54	2.24	.0157311	T	3814.103		

* * * M E M B E R F A T I G U E R E P O R T * * *															
(DAMAGE ORDER)															
ORIGINAL					CHORD										
REQUIRED	JOINT	MEMBER	GRUP	TYPE	OD	WT	JNT	MEM	LEN.	GAP	* STRESS	CONC.	FACTORS	*	FATIGUE RESULTS
OD	WT														
(IN)	(IN)	ID	ID		(IN)	(IN)	TYP	TYP	(FT)	(IN)	AX-CR	AX-SD	IN-PL	OU-PL	DAMAGE LOC SVC LIFE
609	609-	608	A01	TUB	10.75	0.365	T	CHD	13.92		4.35	5.78	3.43	4.27	.0654705 T 916.4437
609	737-	609	A01	TUB	10.75	0.365	T	BRC	13.92		2.82	3.65	2.54	2.36	.78145-3 T 76780.23
609	609-	608	A01	TUB	10.75	0.365	T	CHD	13.92		4.75	5.80	3.43	4.50	.69718-2 L 8606.089
301L	301L-	304	CB1	TUB	18.00	0.375	TK	BRC	52.93	4.00	6.34	4.88	4.38	5.26	.94913-3 R 63215.49
301L	301L-401L	LG4		TUB	34.00	1.655	TK	CHD	52.93		9.18	5.78	5.71	6.77	.31136-2 R 19270.59
301L	301L-	301	CB2	TUB	16.00	0.375	K	BRC	52.93	2.00	6.68	4.87	4.52	5.31	.0202769 T 2959.026
301L	301L-401L	LG4		TUB	34.00	1.655	K	CHD	52.93		8.98	5.54	5.84	6.60	.0635369 T 944.3328
301L	301L-	323	CB3	TUB	12.00	0.375	Y	BRC	52.93		3.15	6.53	4.61	3.75	.76113-4 L 788302.9
301L	301L-401L	LG4		TUB	34.00	1.655	Y	CHD	52.93		7.32	7.58	5.78	4.37	.17595-3 B 341001.3
301L	301L-209L	JD3		TUB	20.00	0.375	K	BRC	52.93	2.00	4.42	3.41	3.61	4.43	.25687-2 T 23358.48
301L	201L-301L	LG3		TUB	34.00	1.655	K	CHD	52.93		7.37	4.75	4.68	5.90	.0253498 T 2366.884
301L	301L-481L	JD7		TUB	20.00	0.375	TK	BRC	52.93	4.00	3.75	2.84	3.26	3.19	.39120-2 T 15337.41
301L	301L-401L	LG4		TUB	34.00	1.655	TK	CHD	52.93		6.64	4.19	4.13	4.24	.0559424 T 1072.531
301L	301L-	201	JD8	TUB	18.00	0.375	TK	BRC	52.93	4.00	3.73	2.61	3.22	2.61	.50510-3 T 118789.2

* * * M E M B E R F A T I G U E R E P O R T * * *																	
(DAMAGE ORDER)																	
ORIGINAL				CHORD													
REQUIRED	JOINT	MEMBER	GRUP	TYPE	OD	WT	JNT	MEM	LEN.	GAP	* STRESS	CONC.	FACTORS	*	FATIGUE RESULTS		
OD	WT																
(IN)	(IN)	ID	ID		(IN)	(IN)	TYP	TYP	(FT)	(IN)	AX-CR	AX-SD	IN-PL	OU-PL	DAMAGE	LOC	SVC LIFE
281L	181L-281L	LGA	TUB		34.00	1.655	K	CHD	50.89		6.93	5.57	5.18	4.31	.94274-4	B	636442.7
601	601-	602	A01	TUB	10.75	0.365	T	BRC	14.09		5.40	4.15	2.54	5.02	.25364-3	TL	236557.0
601	690-	601	A01	TUB	10.75	0.365	T	CHD	14.09		13.60	6.17	3.43	9.58	.41767-2	L	14365.32
101L	101L-	100	E01	TUB	22.00	0.375	Y	BRC	28.50		1.78	6.33	4.00	5.07	.16982-3	TL	353324.5
101L	101L-201L	LG2	TUB		34.00	1.655	Y	CHD	28.50		5.97	7.91	5.27	6.97	.15367-2	T	39045.97
101L	101L-	192	E02	TUB	20.00	0.375	Y	BRC	28.50		1.81	6.50	4.19	4.98	.40515-3	TR	148093.7
101L	101L-201L	LG2	TUB		34.00	1.655	Y	CHD	28.50		5.82	8.14	5.50	6.63	.34177-2	T	17555.57
101L	101L-	196	E03	TUB	18.00	0.375	Y	BRC	28.50		1.88	6.50	4.35	4.76	.67394-5	TL	8902816.
101L	101L-201L	LG2	TUB		34.00	1.655	Y	CHD	28.50		5.71	8.18	5.68	6.13	.58438-4	T	1026732.
119L	119L-	122	E01	TUB	22.00	0.375	Y	BRC	28.50		1.78	6.33	4.00	5.07	.24453-3	TL	245372.0
119L	119L-219L	LG2	TUB		34.00	1.655	Y	CHD	28.50		5.97	7.91	5.27	6.97	.24754-2	T	24238.88
119L	193-119L	E02	TUB		20.00	0.375	Y	BRC	28.50		1.81	6.50	4.19	4.98	.38425-3	TR	156149.2
119L	119L-219L	LG2	TUB		34.00	1.655	Y	CHD	28.50		5.82	8.14	5.50	6.63	.33359-2	T	17986.05

* * * M E M B E R F A T I G U E R E P O R T * * *																	
(DAMAGE ORDER)																	
ORIGINAL					CHORD												
REQUIRED	JOINT	MEMBER	GRUP	TYPE	OD	WT	JNT	MEM	LEN.	GAP	* STRESS	CONC.	FACTORS	*	FATIGUE RESULTS		
OD	WT																
(IN)	(IN)	ID	ID		(IN)	(IN)	TYP	TYP	(FT)	(IN)	AX-CR	AX-SD	IN-PL	OU-PL	DAMAGE	LOC	SVC LIFE
119L	119L-	198	E03	TUB	18.00	0.375	Y	BRC	28.50		1.88	6.50	4.35	4.76	.13424-4	TR	4469613.
119L	119L-219L	LG2		TUB	34.00	1.655	Y	CHD	28.50		5.71	8.18	5.68	6.13	.12349-3	T	485855.1
680	686-	680	A01	TUB	10.75	0.365	T	BRC	14.09		5.40	4.15	2.54	5.02	.16795-3	BL	357239.6
680	680-	620	A01	TUB	10.75	0.365	T	CHD	14.09		13.60	6.17	3.43	9.58	.30354-2	L	19766.65
232	232-	251	D03	TUB	14.00	0.375	K	BRC	43.70	2.00	2.29	4.92	2.95	5.16	.19817-4	R	3027780.
232	227-	232	D02	TUB	16.00	0.375	K	CHD	43.70		4.56	10.97	3.49	9.61	.71433-3	R	83994.43
232	232-281L	D03		TUB	14.00	0.375	TK	BRC	43.70	4.00	2.06	2.64	2.87	3.60	.23128-6	R	25943.44
232	227-	232	D02	TUB	16.00	0.375	TK	CHD	43.70		4.55	6.07	2.70	6.71	.11567-4	R	5187234.
232	254-	232	D03	TUB	14.00	0.375	K	BRC	43.70	2.00	1.96	2.55	2.87	3.62	.48137-6	R	12464.44
232	227-	232	D02	TUB	16.00	0.375	K	CHD	43.70		4.26	5.80	2.67	6.74	.17916-4	R	3348958.
232	201L-	232	D03	TUB	14.00	0.375	TK	BRC	43.70	4.00	2.44	4.97	2.96	5.36	.35195-5	L	17048.43
232	227-	232	D02	TUB	16.00	0.375	TK	CHD	43.70		4.91	11.01	3.51	9.99	.18648-3	L	321753.6
232	201-	232	D04	TUB	8.62	0.322	TK	BRC	43.70	4.00	5.63	10.81	3.60	10.26	.10428-4	L	5753554.
232	227-	232	D02	TUB	16.00	0.375	TK	CHD	43.70		7.84	17.04	4.74	14.81	.65781-4	L	912111.7

* * * M E M B E R F A T I G U E R E P O R T * * *																	
(DAMAGE ORDER)																	
ORIGINAL								CHORD									
REQUIRED				OD	WT	JNT	MEM	LEN.	GAP	* STRESS	CONC.	FACTORS	*	FATIGUE RESULTS			
JOINT	MEMBER	GRUP	TYPE	OD	WT	JNT	MEM	LEN.	GAP	* STRESS	CONC.	FACTORS	*	FATIGUE RESULTS			
OD	WT																
(IN)	(IN)	ID	ID	(IN)	(IN)	TYP	TYP	(FT)	(IN)	AX-CR	AX-SD	IN-PL	OU-PL	DAMAGE	LOC	SVC LIFE	
232	108-	232	LT1	TUB	14.00	0.375	T	BRC	43.70		3.17	11.28	3.03	8.23	.11784-4	L	5091622.
232	227-	232	D02	TUB	16.00	0.375	T	CHD	43.70		6.93	21.18	4.38	15.32	.25453-3	L	235724.9
232	232-	323	LT2	TUB	12.75	0.375	T	BRC	43.70		2.73	14.22	3.23	9.86	.13473-3	L	445321.4
232	227-	232	D02	TUB	16.00	0.375	T	CHD	43.70		5.67	27.04	4.69	17.75	.28501-2	L	21052.12
199L	168-199L	E01		TUB	22.00	0.375	Y	BRC	28.50		1.78	6.33	4.00	5.07	.24162-3	TL	248324.8
199L	199L-299L	LGA		TUB	34.00	1.655	Y	CHD	28.50		5.97	7.91	5.27	6.97	.23551-2	T	25477.08
199L	194-199L	E02		TUB	20.00	0.375	Y	BRC	28.50		1.81	6.50	4.19	4.98	.23270-3	TR	257843.0
199L	199L-299L	LGA		TUB	34.00	1.655	Y	CHD	28.50		5.82	8.14	5.50	6.63	.19739-2	T	30397.28
199L	199L-	197	E03	TUB	18.00	0.375	Y	BRC	28.50		1.88	6.50	4.35	4.76	.10076-4	TL	5954510.
199L	199L-299L	LGA		TUB	34.00	1.655	Y	CHD	28.50		5.71	8.18	5.68	6.13	.78435-4	T	764969.4
181L	161-181L	E01		TUB	22.00	0.375	Y	BRC	28.50		1.78	6.33	4.00	5.07	.13224-3	TL	453711.4
181L	181L-281L	LGA		TUB	34.00	1.655	Y	CHD	28.50		5.97	7.91	5.27	6.97	.13177-2	T	45534.86
181L	181L-	191	E02	TUB	20.00	0.375	Y	BRC	28.50		1.81	6.50	4.19	4.98	.19858-3	TR	302145.2
181L	181L-281L	LGA		TUB	34.00	1.655	Y	CHD	28.50		5.82	8.14	5.50	6.63	.17077-2	T	35134.57

* * * M E M B E R F A T I G U E R E P O R T * * *															
(DAMAGE ORDER)															
ORIGINAL				CHORD											
REQUIRED JOINT	MEMBER	GRUP	TYPE	OD	WT	JNT	MEM	LEN.	GAP	* STRESS	CONC.	FACTORS	FATIGUE RESULTS		
OD	WT														
(IN)	(IN)	ID	ID	(IN)	(IN)	TYP	TYP	(FT)	(IN)	AX-CR	AX-SD	IN-PL	OU-PL	DAMAGE	LOC
181L	181L- 195	E03	TUB	18.00	0.375	Y	BRC	28.50		1.88	6.50	4.35	4.76	.12643-4	TL
181L	181L-281L	LGA	TUB	34.00	1.655	Y	CHD	28.50		5.71	8.18	5.68	6.13	.11058-3	T
684	685- 684	A01	TUB	10.75	0.365	Y	BRC	9.11		3.85	3.73	2.56	4.67	.11994-3	T
684	763- 684	A01	TUB	10.75	0.365	Y	CHD	9.11		9.52	5.75	3.32	8.89	.10225-2	T
698	696- 698	A01	TUB	10.75	0.365	K	BRC	3.70	2.00	2.03	2.01	2.78	2.21	.56136-4	TR
698	501L- 698	A01	TUB	10.75	0.365	K	CHD	3.70		3.83	3.65	2.35	4.22	.10020-2	R
698	698- 660	A01	TUB	10.75	0.365	K	BRC	3.53	2.00	2.27	2.27	2.72	2.27	.44029-4	L
698	698-509L	A01	TUB	10.75	0.365	K	CHD	3.53		4.36	4.17	2.59	4.33	.99501-3	L
103	107- 103	E04	TUB	8.62	0.322	T	BRC	45.50		3.88	18.94	4.44	11.97	.11042-5	L
103	103- 168	E01	TUB	22.00	0.375	T	CHD	45.50		9.87	26.32	5.95	16.16	.51099-5	L
103	103-299L	JD9	TUB	22.00	0.375	K	BRC	46.55	2.00	3.15	3.13	2.64	7.87	.28373-4	TL
103	103- 168	E01	TUB	22.00	0.375	K	CHD	46.55		6.43	6.35	3.57	15.54	.71595-3	TL
103	219L- 103	JD9	TUB	22.00	0.375	K	BRC	46.55	2.00	3.16	3.13	2.64	7.87	.25971-4	TR

* * * M E M B E R F A T I G U E R E P O R T * * *															
(DAMAGE ORDER)															
ORIGINAL				CHORD											
REQUIRED JOINT	MEMBER	GRUP	TYPE	OD	WT	JNT	MEM	LEN.	GAP	* STRESS	CONC.	FACTORS	FATIGUE RESULTS		
OD	WT														
(IN)	(IN)	ID	ID	(IN)	(IN)	TYP	TYP	(FT)	(IN)	AX-CR	AX-SD	IN-PL	OU-PL	DAMAGE	LOC
103	122- 103	E01	TUB	22.00	0.375	K	CHD	46.55		6.46	6.36	3.57	15.53	.65926-3	TR
335	335- 300	CB4	TUB	10.75	0.375	Y	BRC	17.42		5.38	4.52	2.86	4.85	.15967-3	T
335	335-389L	CB3	TUB	12.00	0.375	Y	CHD	17.42		11.51	10.28	3.21	8.98	.59449-3	T
338	338- 314	CB4	TUB	10.75	0.375	Y	BRC	17.42		5.38	4.52	2.86	4.85	.15683-3	T
338	338-309L	CB3	TUB	12.00	0.375	Y	CHD	17.42		11.51	10.28	3.21	8.98	.58857-3	T
405	405- 401	B02	TUB	12.75	0.375	Y	BRC	22.73		6.84	4.65	2.61	5.70	.31013-4	BL
405	405- 496	B02	TUB	12.75	0.375	Y	CHD	22.73		17.65	7.07	3.58	10.95	.58113-3	BL
106	106- 107	E03	TUB	18.00	0.375	Y	BRC	34.19		5.40	10.65	3.13	11.40	.23138-4	R
106	106- 193	E02	TUB	20.00	0.375	Y	CHD	34.19		15.72	18.05	4.60	21.68	.57519-3	R
105	105- 108	E03	TUB	18.00	0.375	Y	BRC	34.19		5.40	10.65	3.13	11.40	.22859-4	L
105	192- 105	E02	TUB	20.00	0.375	Y	CHD	34.19		15.72	18.05	4.60	21.68	.56833-3	L
101	101- 108	E04	TUB	8.62	0.322	T	BRC	45.50		3.88	18.94	4.44	11.97	.38744-5	L

* * * M E M B E R F A T I G U E R E P O R T * * *															
(DAMAGE ORDER)															
ORIGINAL				CHORD											
REQUIRED JOINT	MEMBER	GRUP	TYPE	OD	WT	JNT	MEM	LEN.	GAP	* STRESS	CONC.	FACTORS	FATIGUE RESULTS		
OD	WT														
(IN)	(IN)	ID	ID	(IN)	(IN)	TYP	TYP	(FT)	(IN)	AX-CR	AX-SD	IN-PL	OU-PL	DAMAGE	LOC
101	100- 101	E01	TUB	22.00	0.375	T	CHD	45.50		9.87	26.32	5.95	16.16	.17845-4	L
101	101-281L	JD9	TUB	22.00	0.375	K	BRC	46.55	2.00	3.18	3.14	2.64	7.86	.21165-4	TR
101	101- 161	E01	TUB	22.00	0.375	K	CHD	46.55		6.51	6.36	3.57	15.52	.53853-3	TR
101	201L- 101	JD9	TUB	22.00	0.375	K	BRC	46.55	2.00	3.18	3.14	2.64	7.86	.15109-4	T
101	100- 101	E01	TUB	22.00	0.375	K	CHD	46.55		6.51	6.36	3.57	15.52	.35512-3	TL
418	450- 418	B02	TUB	12.75	0.375	T	BRC	17.45		4.63	7.66	2.85	8.22	.22217-4	L
418	418- 4A	B01	TUB	14.00	0.375	T	CHD	17.45		12.17	12.17	4.02	15.42	.46250-3	L
233	233- 252	D03	TUB	14.00	0.375	K	BRC	27.00	2.00	2.26	4.95	2.95	5.14	.78774-5	L
233	206- 233	D02	TUB	16.00	0.375	K	CHD	27.00		4.53	11.05	3.49	9.58	.34452-3	L
233	233-299L	D03	TUB	14.00	0.375	TK	BRC	27.00	4.00	2.03	2.66	2.87	3.48	.42008-6	R
233	206- 233	D02	TUB	16.00	0.375	TK	CHD	27.00		4.50	6.13	2.70	6.49	.24048-4	R
233	253- 233	D03	TUB	14.00	0.375	K	BRC	27.00	2.00	1.98	2.57	2.87	3.54	.27307-6	L
233	206- 233	D02	TUB	16.00	0.375	K	CHD	27.00		4.32	5.89	2.67	6.59	.13536-4	L
233	219L- 233	D03	TUB	14.00	0.375	TK	BRC	27.00	4.00	2.43	4.97	2.96	5.32	.53204-5	R

* * * M E M B E R F A T I G U E R E P O R T * * *															
(DAMAGE ORDER)															
ORIGINAL				CHORD											
REQUIRED JOINT	MEMBER	GRUP	TYPE	OD	WT	JNT	MEM	LEN.	GAP	* STRESS	CONC.	FACTORS	FATIGUE RESULTS		
OD	WT														
(IN)	(IN)	ID	ID	(IN)	(IN)	TYP	TYP	(FT)	(IN)	AX-CR	AX-SD	IN-PL	OU-PL	DAMAGE	LOC
233	206- 233	D02	TUB	16.00	0.375	TK	CHD	27.00		4.91	11.03	3.51	9.91	.26879-3	R
233	233- 203	D04	TUB	8.62	0.322	TK	BRC	27.00	4.00	6.17	10.02	3.60	10.23	.14401-5	R
233	206- 233	D02	TUB	16.00	0.375	TK	CHD	27.00		8.56	15.40	4.74	14.77	.92904-5	R
233	107- 233	LT1	TUB	14.00	0.375	T	BRC	27.00		5.61	9.91	3.03	9.99	.24919-5	R
233	206- 233	D02	TUB	16.00	0.375	T	CHD	27.00		15.13	15.61	4.38	18.60	.52916-4	R
402	402- 400	B02	TUB	12.75	0.375	T	BRC	22.71		6.83	4.68	2.61	5.74	.10618-4	L
402	402-409L	B02	TUB	12.75	0.375	T	CHD	22.71		17.68	7.11	3.59	11.02	.25959-3	L
301	301- 323	CB6	TUB	14.00	0.375	T	BRC	26.51		5.52	9.86	3.03	9.96	.86723-5	R
301	301L- 301	CB2	TUB	16.00	0.375	T	CHD	26.51		14.89	15.62	4.38	18.56	.18928-3	R
351	352- 351	CB2	TUB	16.00	0.375	K	BRC	32.43	2.00	4.10	4.36	3.01	10.25	.24912-5	TL
351	319L- 351	CB1	TUB	18.00	0.375	K	CHD	32.43		8.11	8.32	4.06	19.31	.45789-4	L
351	389L- 351	CB2	TUB	16.00	0.375	K	BRC	32.43	2.00	4.07	4.30	3.01	10.28	.37963-5	R
351	351- 359	CB1	TUB	18.00	0.375	K	CHD	32.43		8.00	8.18	4.06	19.36	.88886-4	R

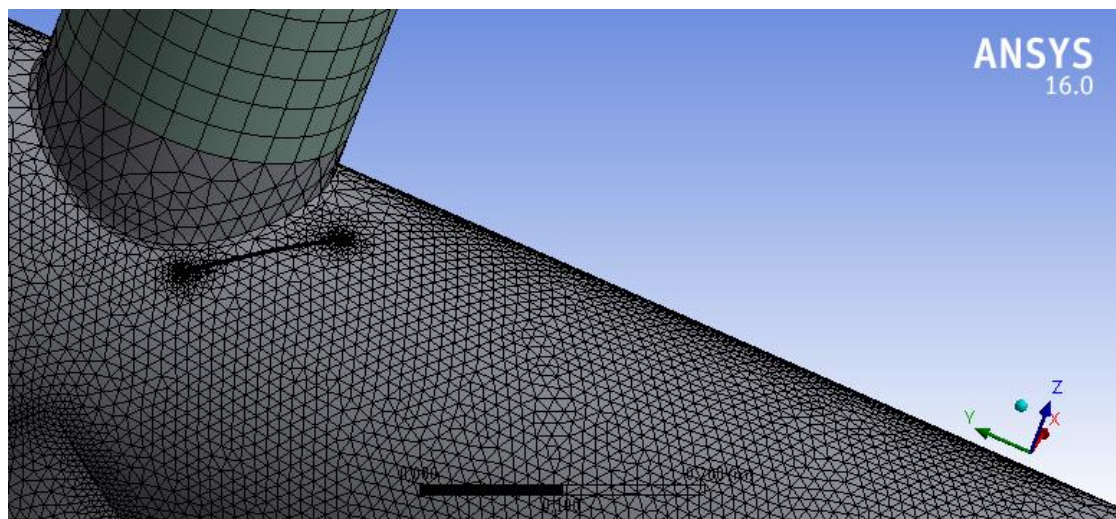
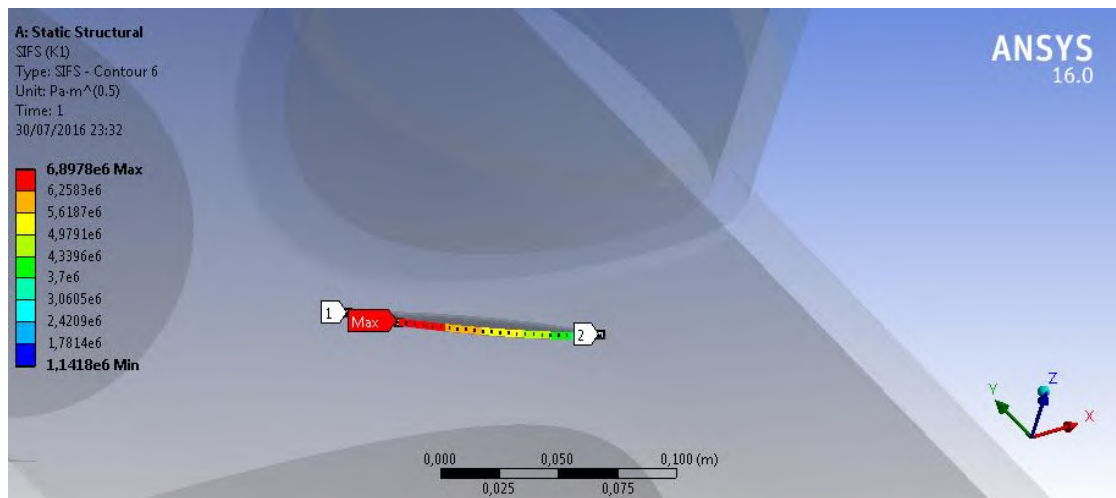
\* \* \* M E M B E R F A T I G U E R E P O R T \* \* \*  
(DAMAGE ORDER)

				ORIGINAL				CHORD											
REQUIRED																			
JOINT	MEMBER	GRUP	TYPE	OD	WT	JNT	MEM	LEN.	GAP	* STRESS	CONC.	FACTORS	*	FATIGUE RESULTS					
OD	WT																		
		ID	ID	(IN)	(IN)	TYP	TYP	(FT)	(IN)	AX-CR	AX-SD	IN-PL	OU-PL	DAMAGE	LOC	SVC	LIFE		
(IN)	(IN)																		
325	325-	352	CB6	TUB	14.00	0.375	Y	BRC	26.51		5.53	9.74	3.03	9.86	.29075-6	L	20636.+4		
325	325-	309	CB2	TUB	16.00	0.375	Y	CHD	26.51		14.83	15.66	4.36	18.37	.55707-5	L	10771.+3		
352	325-	352	CB6	TUB	14.00	0.375	K	BRC	25.06	2.00	3.73	3.85	2.97	8.67	.48509-7	L	12369.+5		
352	309L-	352	CB2	TUB	16.00	0.375	K	CHD	25.06		7.32	7.56	3.70	16.15	.11064-5	L	54231.+3		
352	352-319L	CB6	TUB	14.00	0.375	K	BRC	24.90	2.00	4.50	5.47	3.00	9.08	.23710-6	TR	25306.+4			
352	352-	351	CB2	TUB	16.00	0.375	K	CHD	24.90		9.58	10.40	4.02	16.92	.40841-5	R	14691.+3		
206	206-	233	D02	TUB	16.00	0.375	Y	BRC	30.44		6.94	5.49	2.73	7.02	.47682-8	B	12583.+6		
206	206-	294	D02	TUB	16.00	0.375	Y	CHD	30.44		18.86	8.80	3.83	13.64	.71594-7	BL	83806.+4		
227	227-	232	D02	TUB	16.00	0.375	Y	BRC	30.45		6.94	5.49	2.73	7.02	.50951-8	TL	11776.+6		
227	201L-	227	D02	TUB	16.00	0.375	Y	CHD	30.45		18.86	8.80	3.83	13.64	.69666-7	TL	86125.+4		

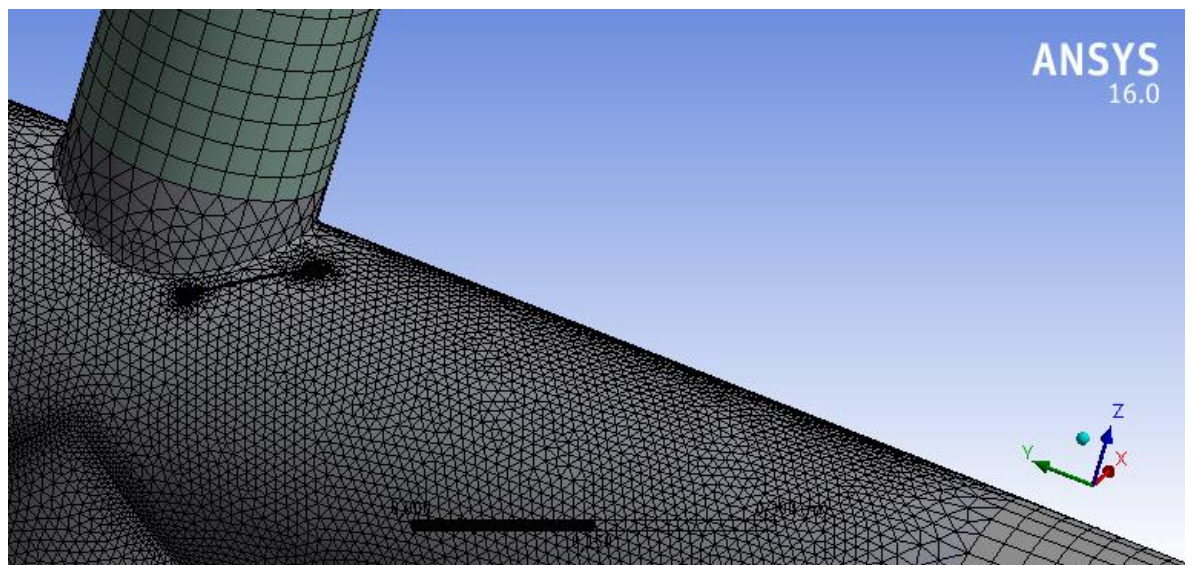
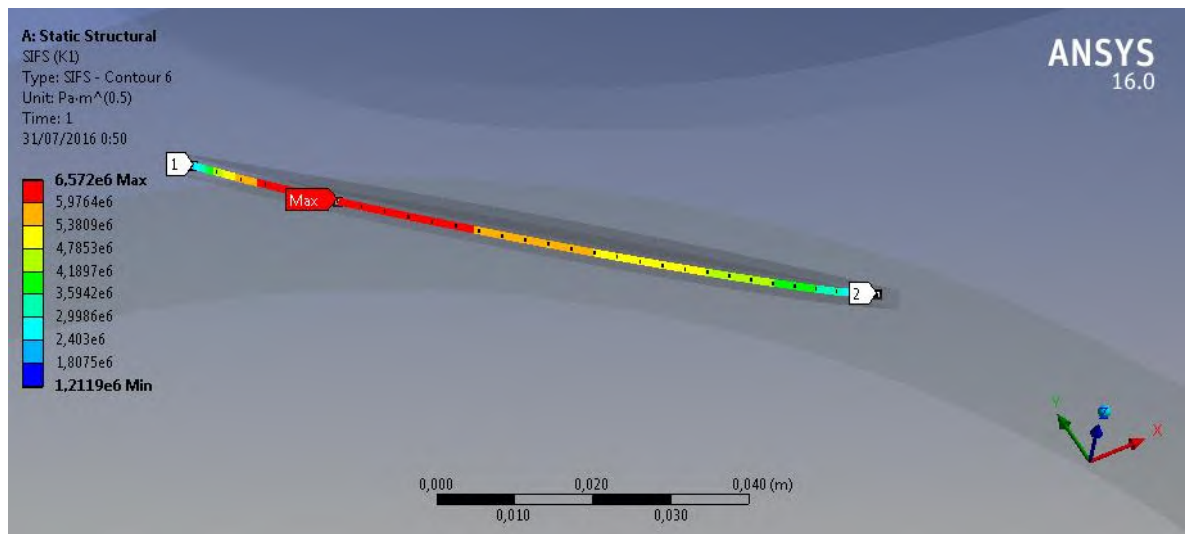
## **LAMPIRAN C**

**Model *Crack* dan Nilai *Stress Intensity Factor***

Kedalaman retak a = 9,25 mm

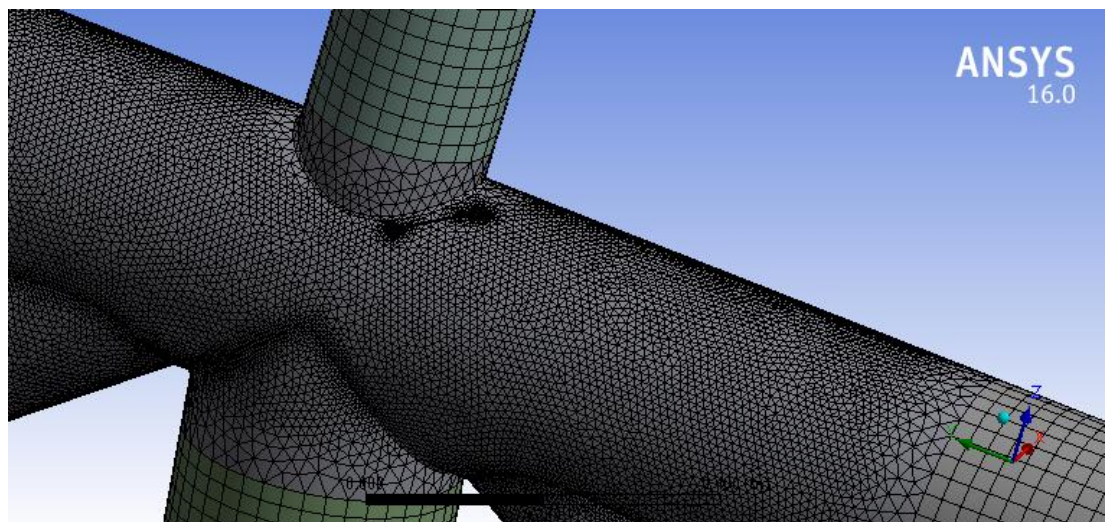
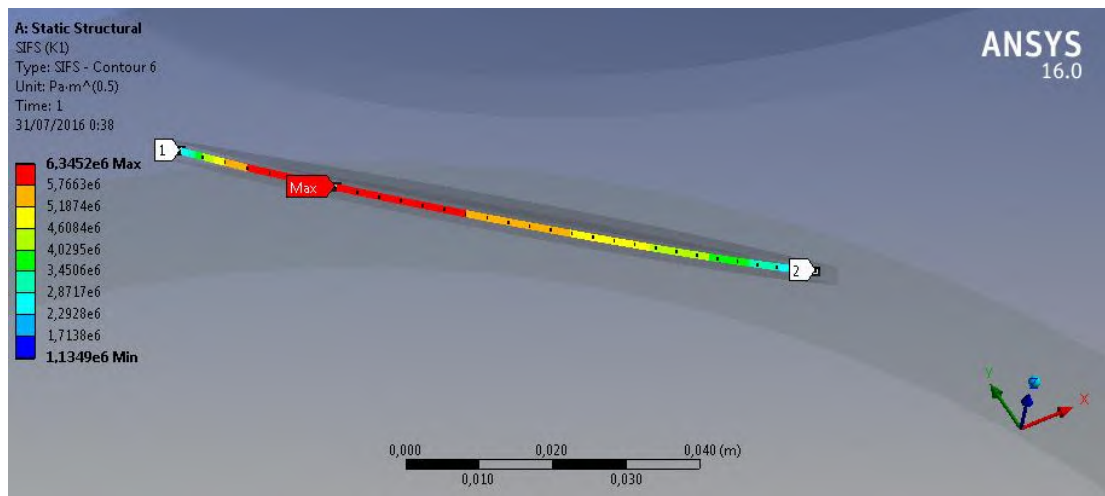


Kedalaman retak  $a = 8,75 \text{ mm}$

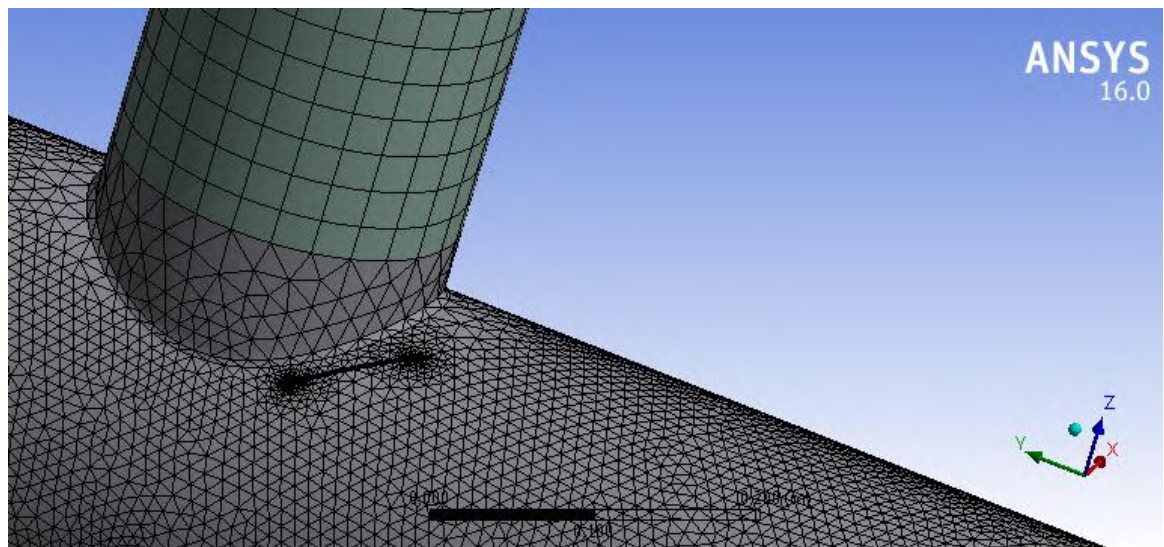
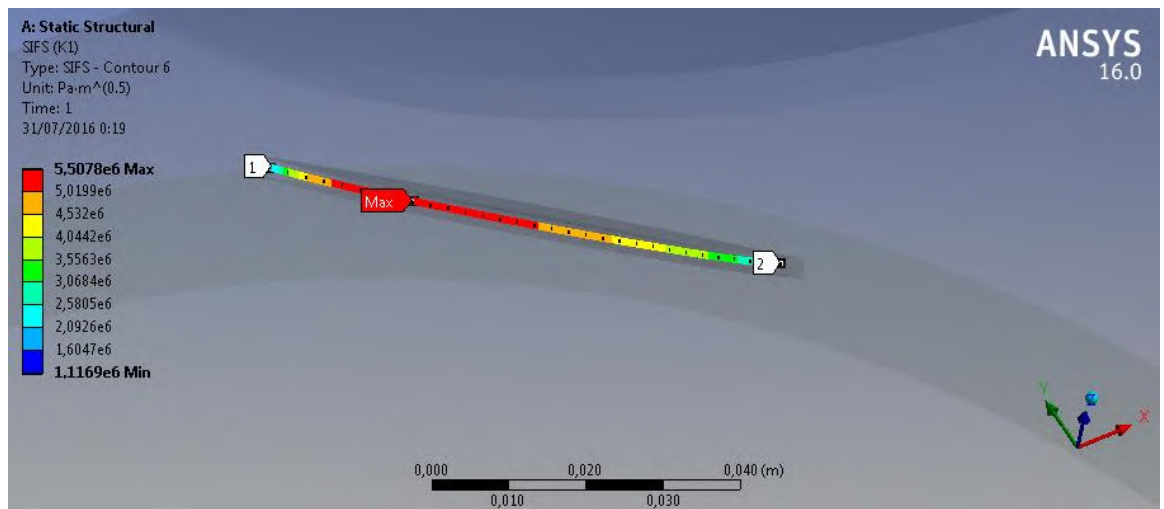




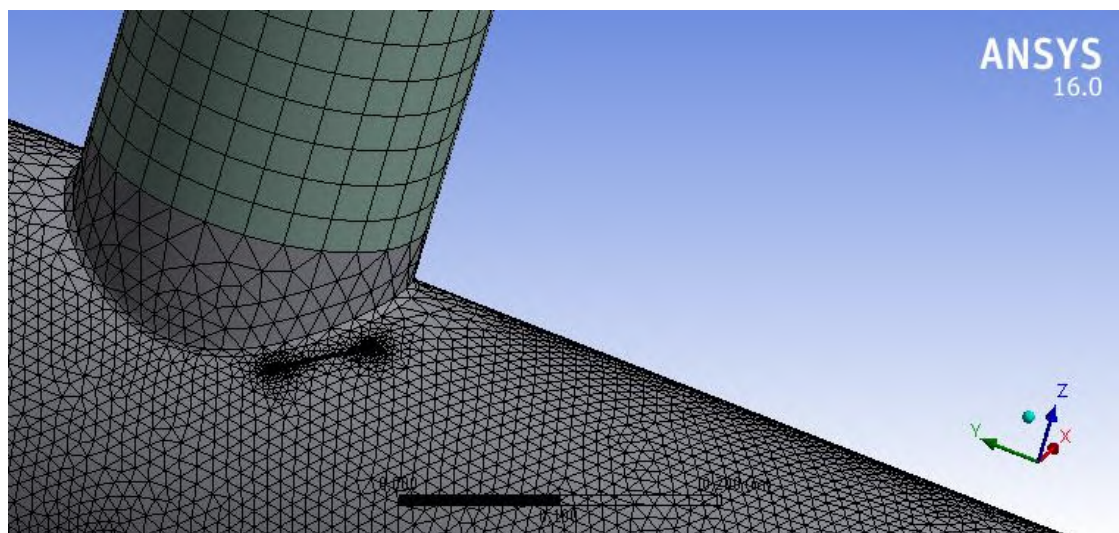
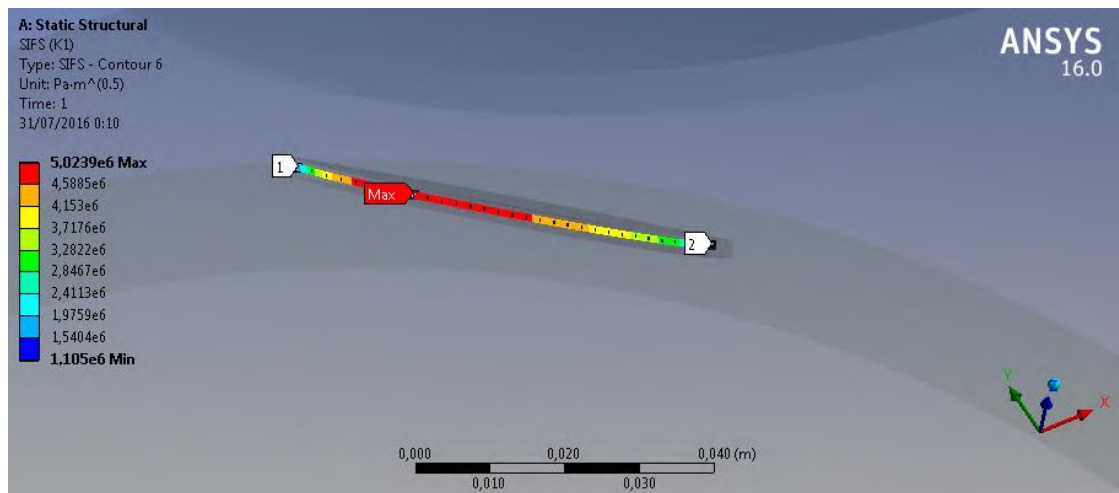
Kedalaman retak  $a = 7,75 \text{ mm}$



Kedalaman retak a = 5,75 mm

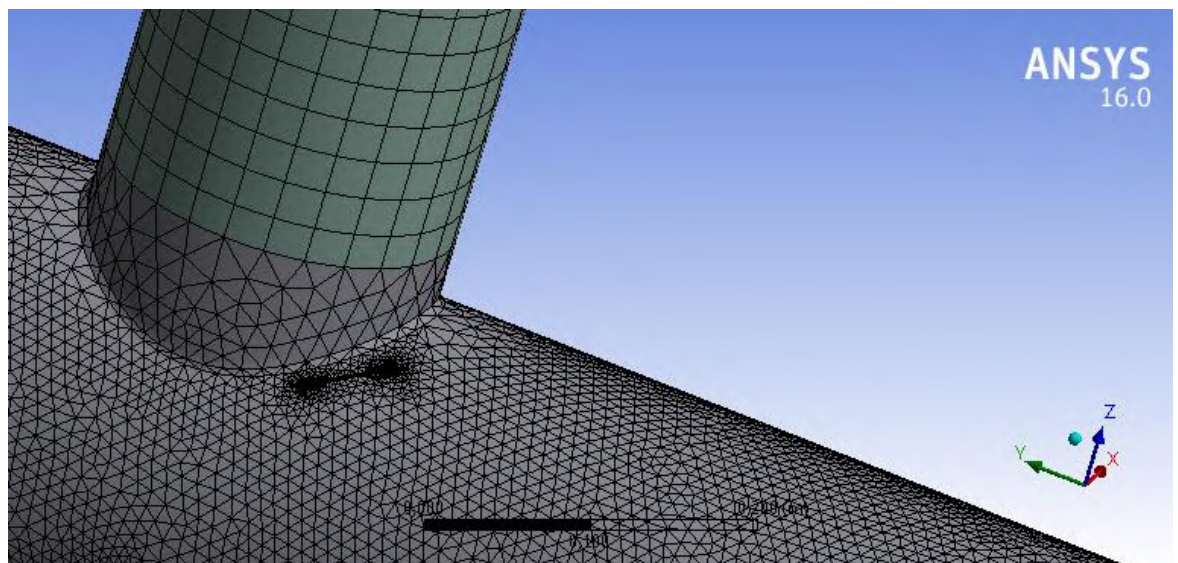
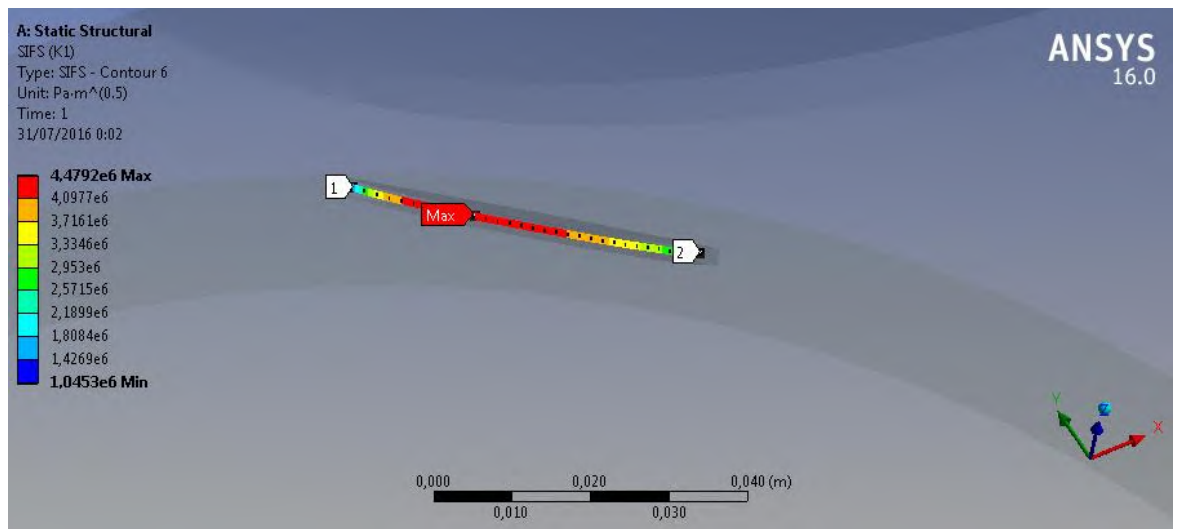


Kedalaman retak a = 4,75 mm

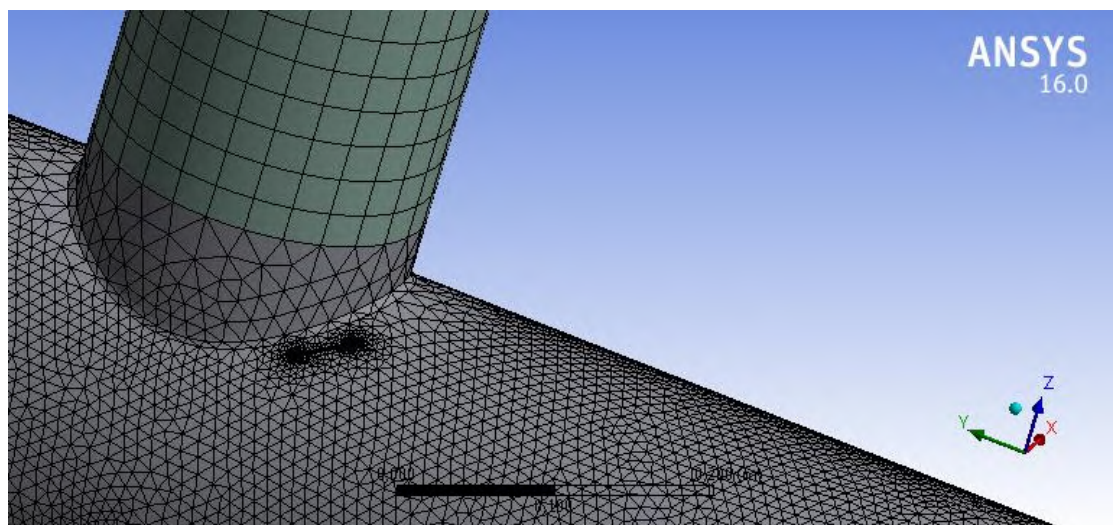
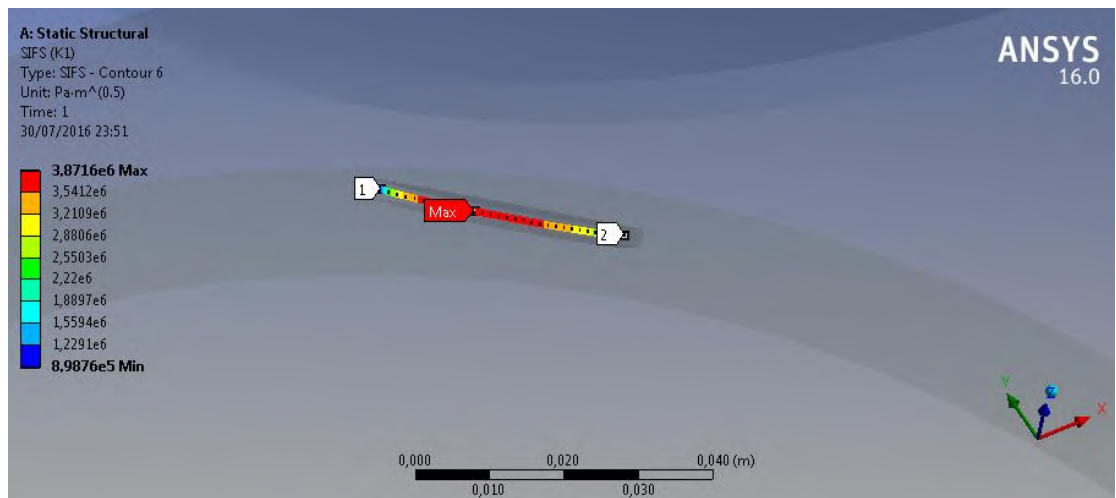




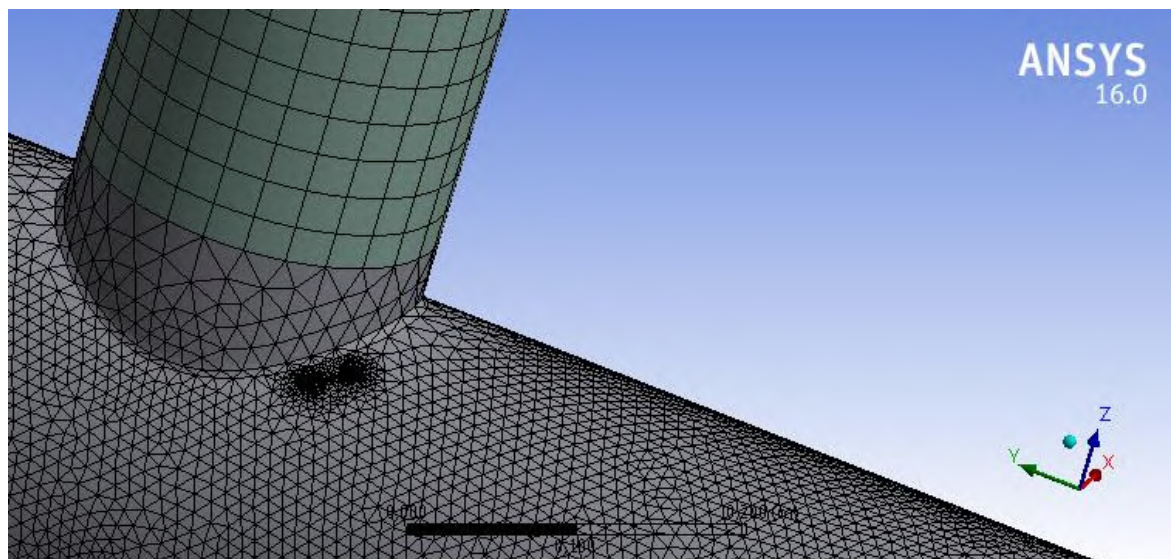
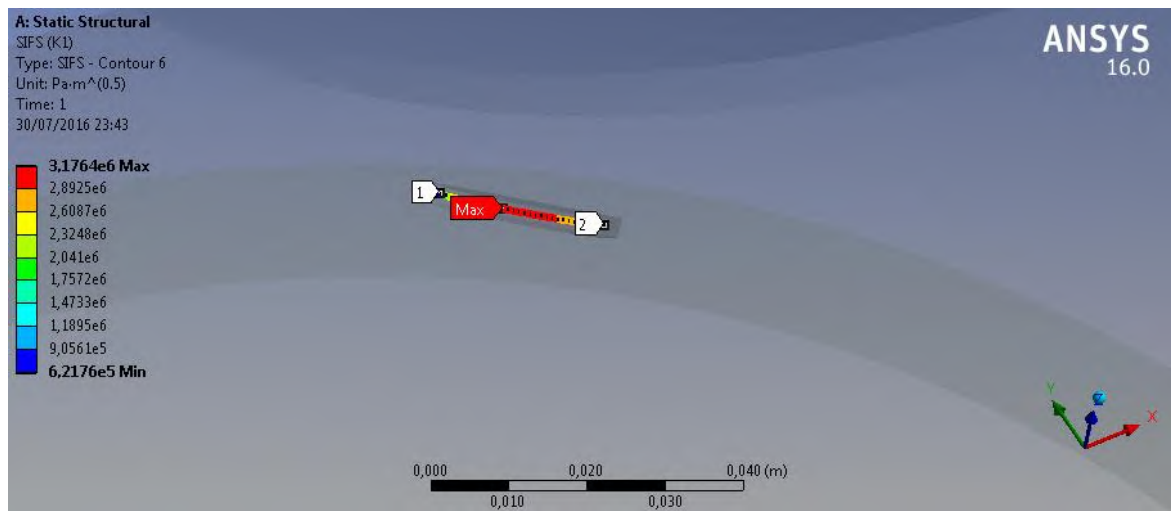
Kedalaman retak a = 3,75 mm



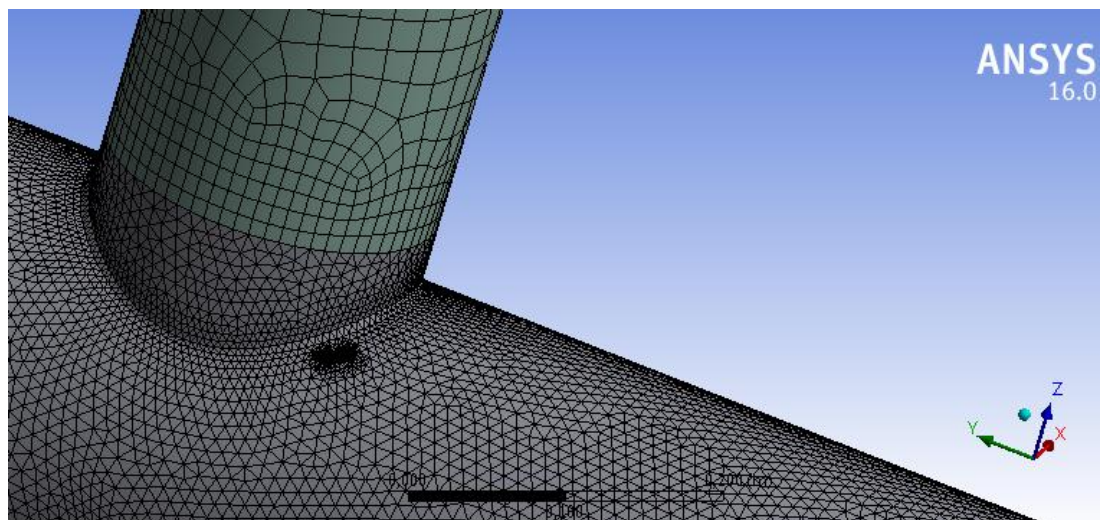
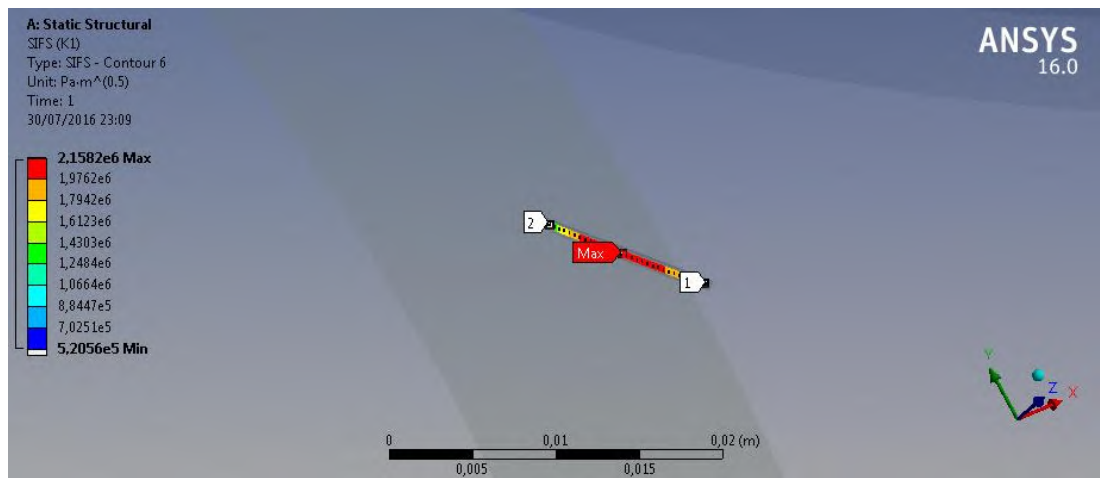
Kedalaman retak a = 2,75 mm



Kedalaman retak a = 1,75 mm



Kedalaman retak a = 0,75 mm



## **LAMPIRAN D**

**Perhitungan *Stress Intensity Factor*,  
Kecepatan Perambatan Retak, dan *Fatigue*  
*Life***



$$\begin{aligned}
 a/2c &= 0,15 \\
 \Delta\sigma &= 38,91 \text{ MPa} = 5,64 \text{ ksi} \\
 Q &= 1,2 \\
 t &= 0,375 \text{ in}
 \end{aligned}$$

	cycle	error
ansys	1,1E+08	4,47
rumus	1,0E+08	

	dari ANSYS				dari rumus			
$a_{avg}$ (in)	$\Delta K$ (MPa $\sqrt{m}$ )	$\Delta K$ (ksi $\sqrt{in}$ )	da/dN	$\Delta N$	$M_k$	$\Delta K$ (ksi $\sqrt{in}$ )	da/dN	$\Delta N$
0,03	2,15	1,96	2,7E-09	1,1E+07	1,00	1,76	2,0E-09	1,5E+07
0,05	2,70	2,46	5,3E-09	9,2E+06	1,00	2,27	4,2E-09	1,2E+07
0,07	3,17	2,88	8,6E-09	8,0E+06	1,00	2,68	7,0E-09	9,9E+06
0,09	3,60	3,28	1,3E-08	7,0E+06	1,00	3,04	1,0E-08	8,7E+06
0,11	3,87	3,52	1,6E-08	6,9E+06	1,00	3,37	1,4E-08	7,9E+06
0,13	4,18	3,80	2,0E-08	6,5E+06	1,00	3,66	1,8E-08	7,3E+06
0,15	4,48	4,08	2,4E-08	6,1E+06	1,00	3,93	2,2E-08	6,8E+06
0,17	4,74	4,31	2,9E-08	5,8E+06	1,00	4,18	2,6E-08	6,3E+06
0,19	5,02	4,57	3,4E-08	5,5E+06	1,00	4,42	3,1E-08	6,0E+06
0,21	5,31	4,83	4,1E-08	5,1E+06	1,06	4,94	4,3E-08	4,8E+06
0,23	5,51	5,01	4,5E-08	5,0E+06	1,12	5,47	5,9E-08	3,8E+06
0,25	5,74	5,22	5,1E-08	4,8E+06	1,19	6,03	7,9E-08	3,1E+06
0,27	5,94	5,41	5,7E-08	4,7E+06	1,25	6,60	1,0E-07	2,6E+06
0,29	6,19	5,63	6,4E-08	4,4E+06	1,31	7,18	1,3E-07	2,1E+06
0,31	6,35	5,77	6,9E-08	4,4E+06	1,38	7,78	1,7E-07	1,8E+06
0,33	6,57	5,98	7,7E-08	4,2E+06	1,44	8,40	2,1E-07	1,5E+06
0,34	6,73	6,12	8,3E-08	4,2E+06	1,50	9,02	2,6E-07	1,3E+06
0,36	6,89	6,27	8,9E-08	4,1E+06	1,57	9,67	3,3E-07	1,1E+06
			$\Sigma N$	1,1E+08			$\Sigma N$	1,0E+08

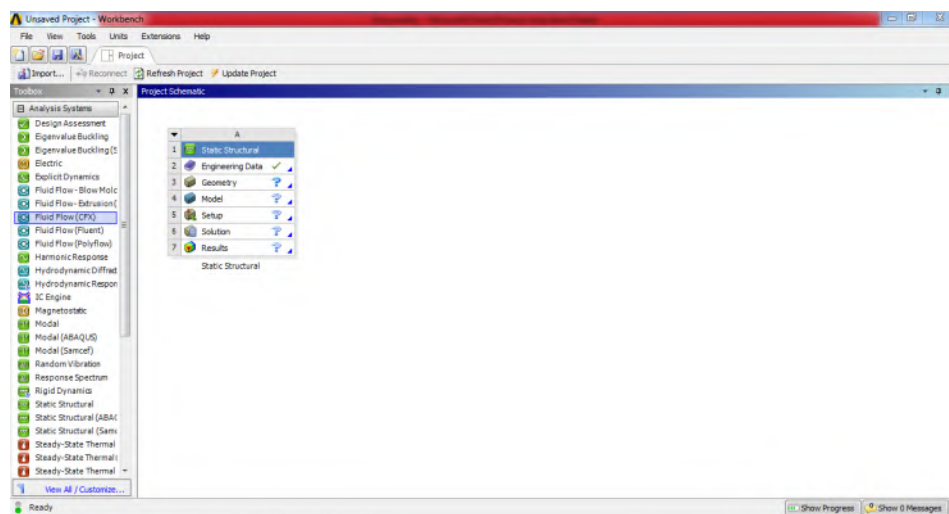
## **LAMPIRAN E**

**Prosedur *Running Stress Intensity Factor*  
menggunakan *ANSYS 16.0***

## PROSEDUR ANALISIS *STRESS INTENSITY FACTOR* MENGUNAKAN ANSYS 16.0

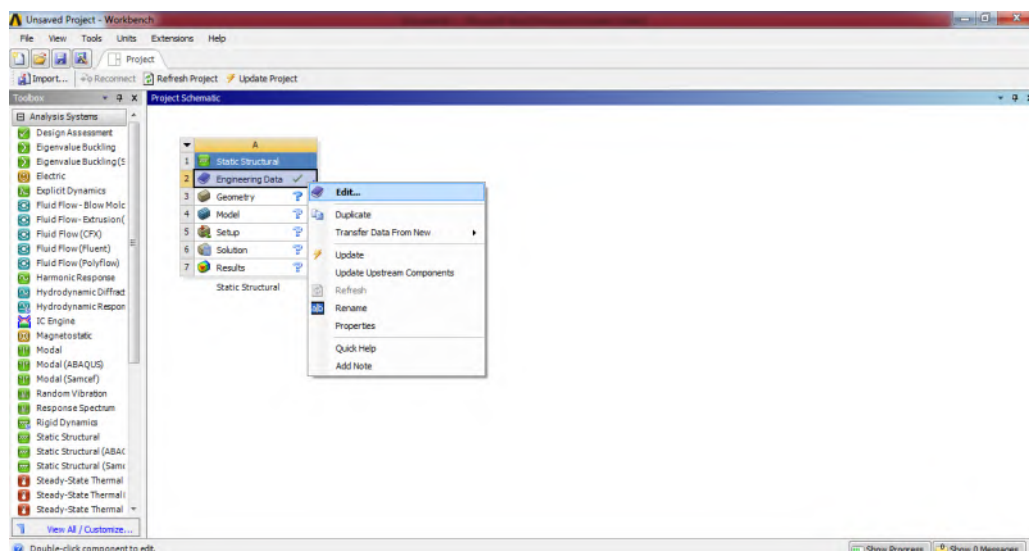
### 1. Pemilihan Jenis Analisis yang Akan Digunakan

Saat tampilan halaman utama ANSYS 16.0 muncul, pada menu **Toolbox** pilih jenis analisis yang akan digunakan yakni *Static Structural*. Pemilihan jenis analisis dapat dilakukan dengan cara **klik 2 kali** pada jenis analisis tersebut atau dengan menggesernya (*drag*) ke bagian tab *Project Schematic*. Hasil tampilan dapat dilihat pada gambar di bawah ini.

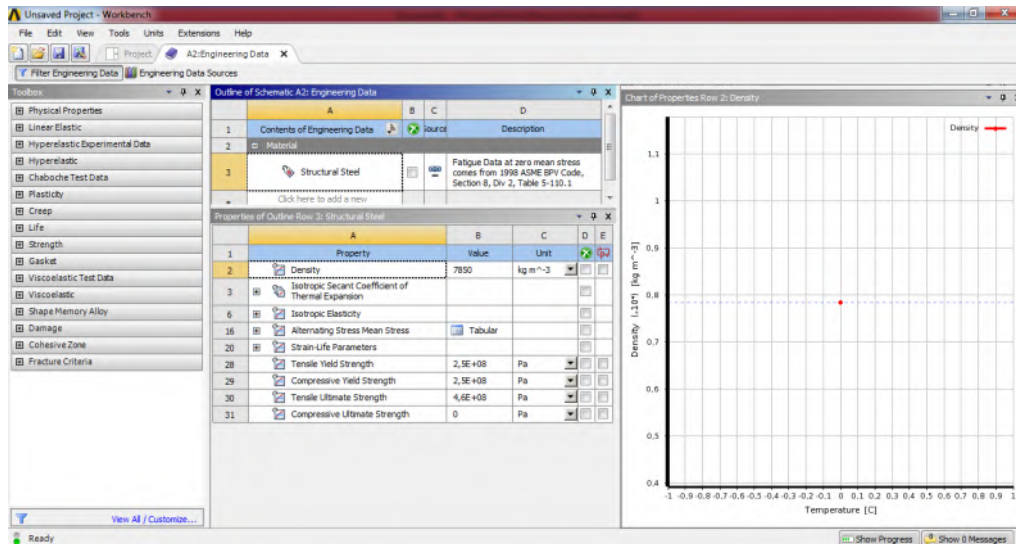


### 2. *Input* data Kriteria Material

Selanjutnya pada bagian *Engineering Data*, dapat dimasukkan data-data yang berkaitan dengan *material properties* yang digunakan dalam analisis. Cara *input*-nya adalah dengan **klik kanan** pada *Engineering Data* > *Edit*.

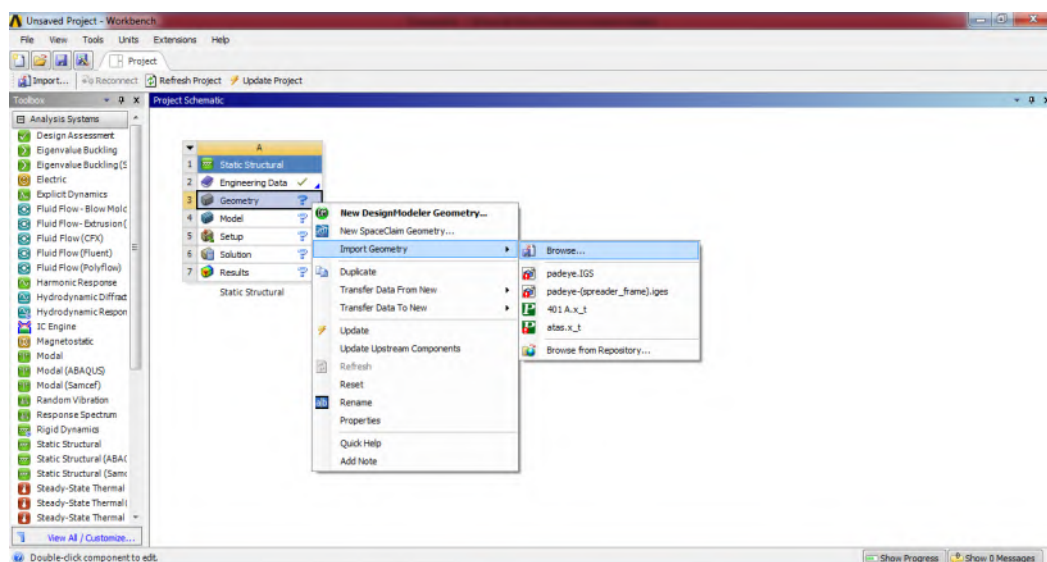


Kemudian akan muncul tab dialog baru untuk memasukkan data-data yang berkaitan dengan *material properties* seperti pada gambar di bawah ini.

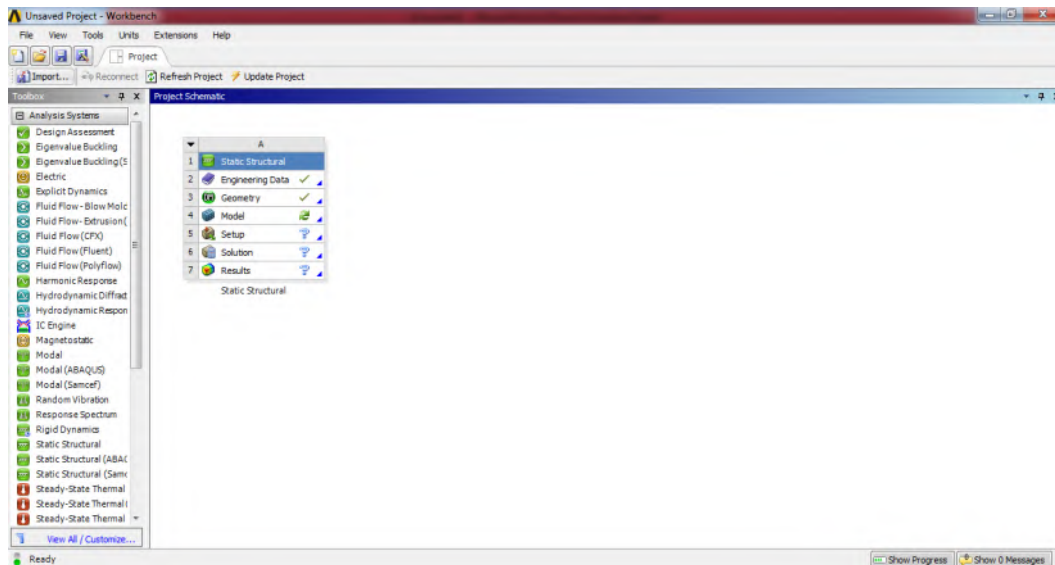


### 3. Import Model Solid Element ke ANSYS

Langkah selanjutnya adalah *import* model *solid element* ke ANSYS dengan cara **klik** **kanan** pada bagian *Geometry* kemudian **klik** *Import Geometry > Browse*.

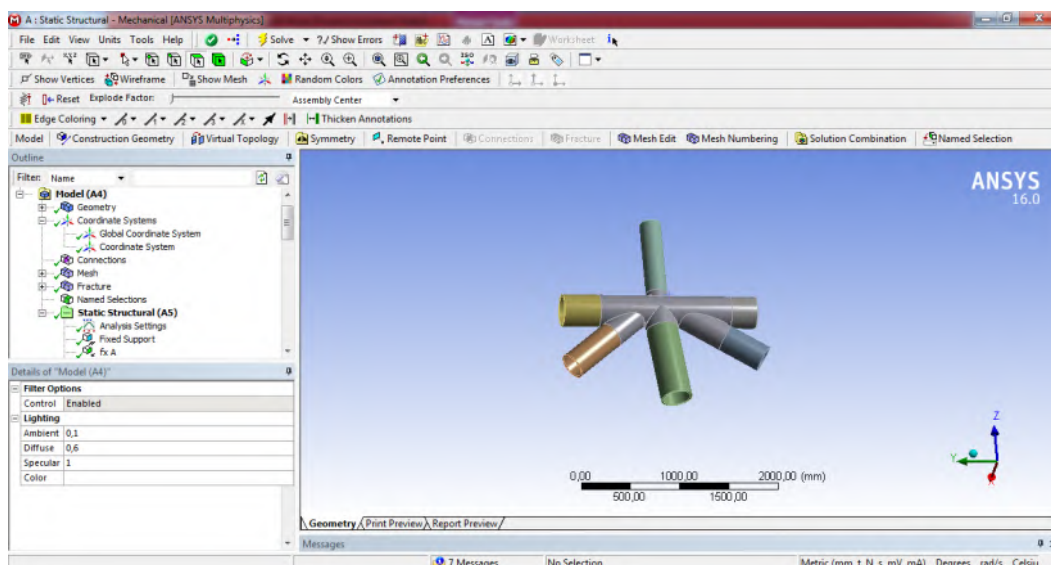


Pilih model *solid element* yang akan digunakan. Dalam penelitian model *solid element* sudah dibagi menjadi beberapa bagian dikarenakan untuk mempermudah pengaturan saat proses *meshing*. Apabila sudah terdapat tanda *checklist* (✓) maka model *solid element* sudah selesai di-*input*-kan.

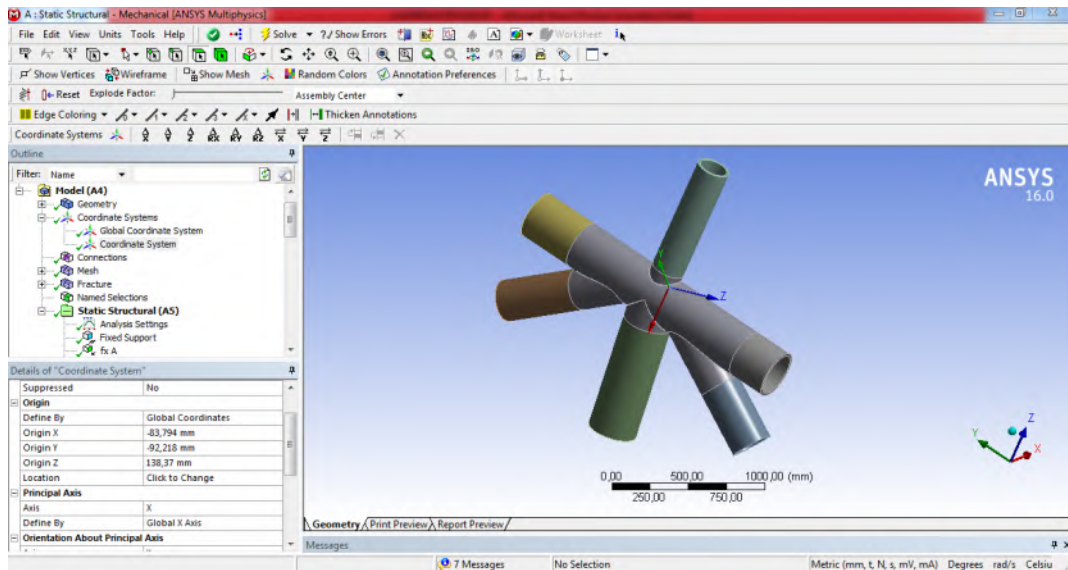


#### 4. Menentukan Sistem Koordinat untuk Posisi *Crack*

Untuk memulai pemodelan *crack* dapat dilakukan dengan cara **klik 2 kali** pada bagian **Model**. Kemudian muncul tampilan utama dari ANSYS *Multiphysics* seperti gambar berikut.

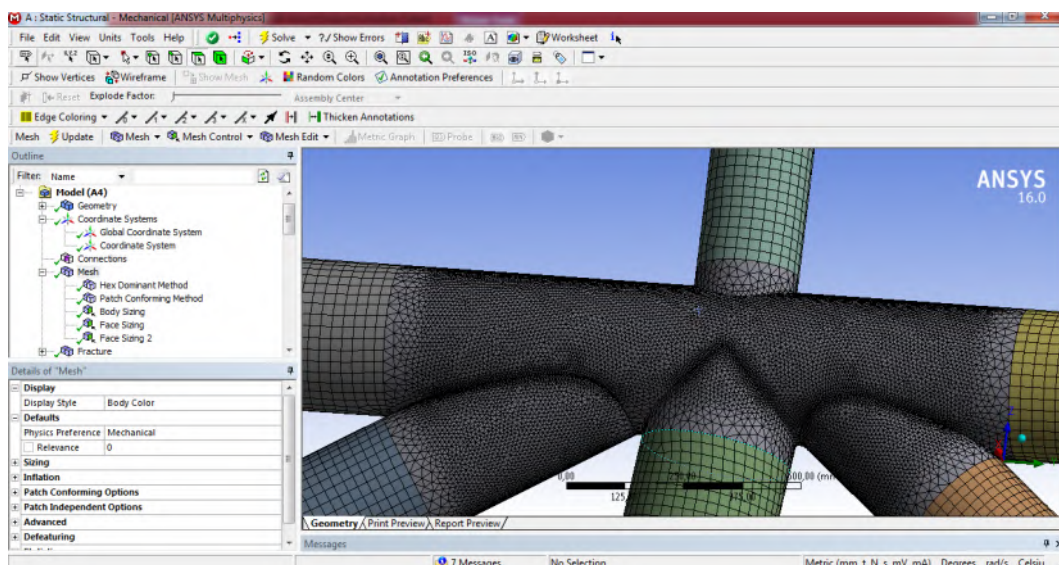


Untuk menentukan koordinat *crack*, dapat dilakukan dengan cara **klik kanan** pada **Coordinate Systems** > **klik insert** > **klik Coordinate Systems**. Kemudian letak koordinat *crack* dapat dimasukkan.



## 5. Melakukan *Meshing* pada Model

Kemudian melakukan *meshing* pada model dengan ketentuan *meshing* pada bagian *crack* diperhalus agar hasil analisis terfokus pada daerah *crack*-nya. Cara *input meshing* terdiri dari 2 tahap, yaitu *input metode meshing* dan *input ukuran meshing*. Hasilnya dapat dilihat seperti gambar berikut.

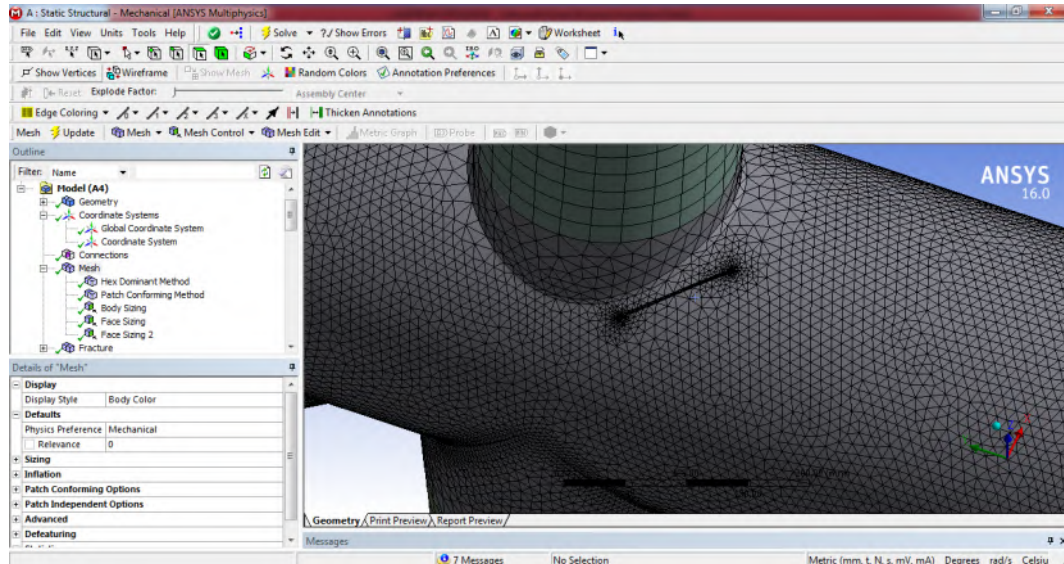


## 6. Melakukan *Meshing Fracture* pada Model

Untuk *meshing fracture* dilakukan *input model crack* dengan cara **klik kanan** pada bagian **Fracture** > **klik Insert** > **klik Crack**. Kemudian geometri *crack* dapat

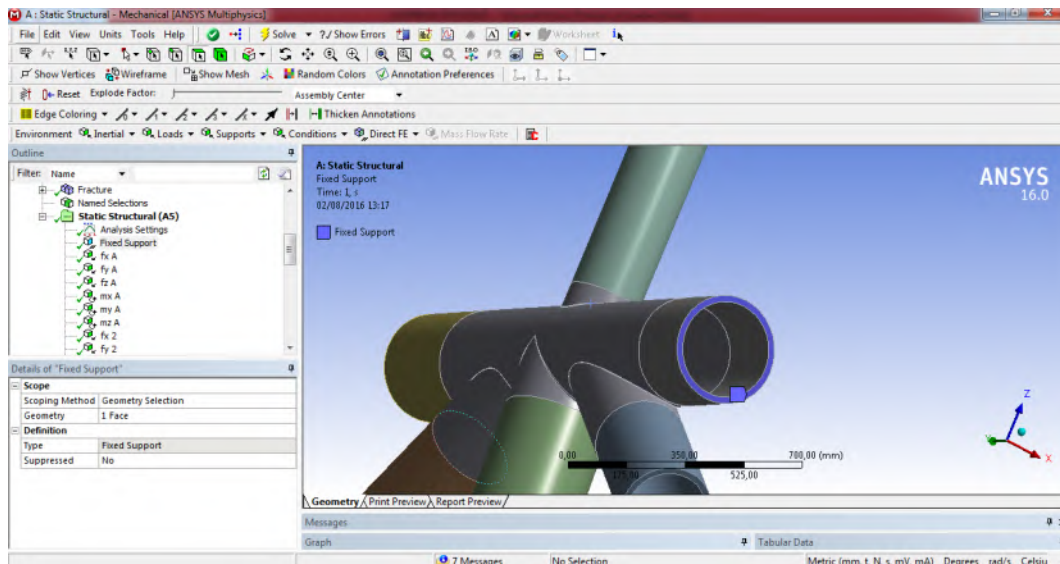


dimasukkan. Selanjutnya dilakukan *meshing* ulang dengan cara **klik kanan Mesh > klik Update**. Hasilnya dapat dilihat seperti gambar berikut.

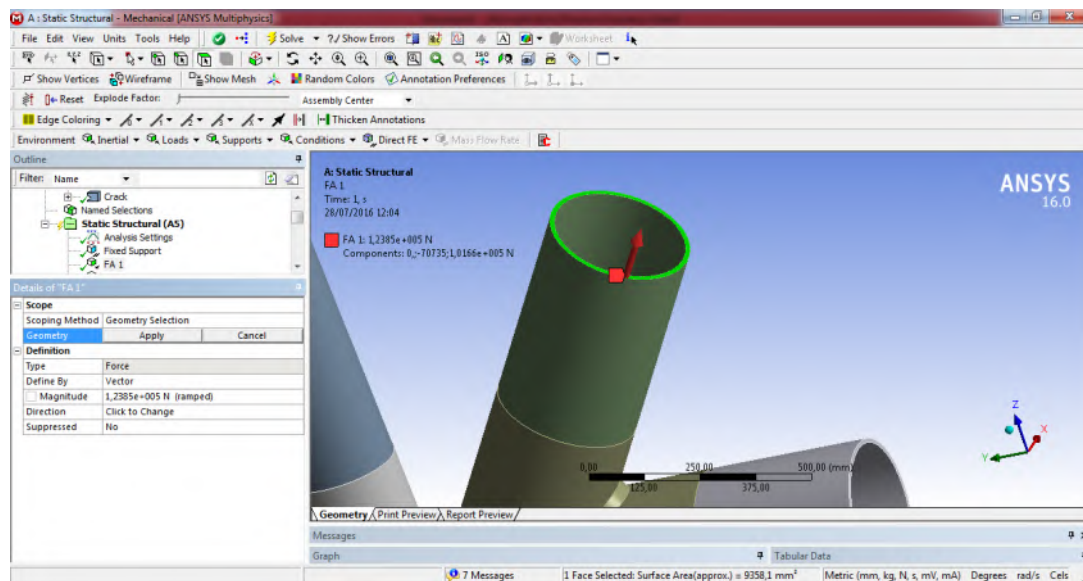


## 7. Pemberian Kondisi Batas dan Pembebanan

Pemberian Kondisi Batas pada Model dapat dilakukan dengan cara **klik kanan Static Structural (A5) > klik Fixed Support**. Akan muncul tab dialog baru kemudian arahkan kursor ke bagian yang akan diberikan kondisi batas lalu **klik Apply**.

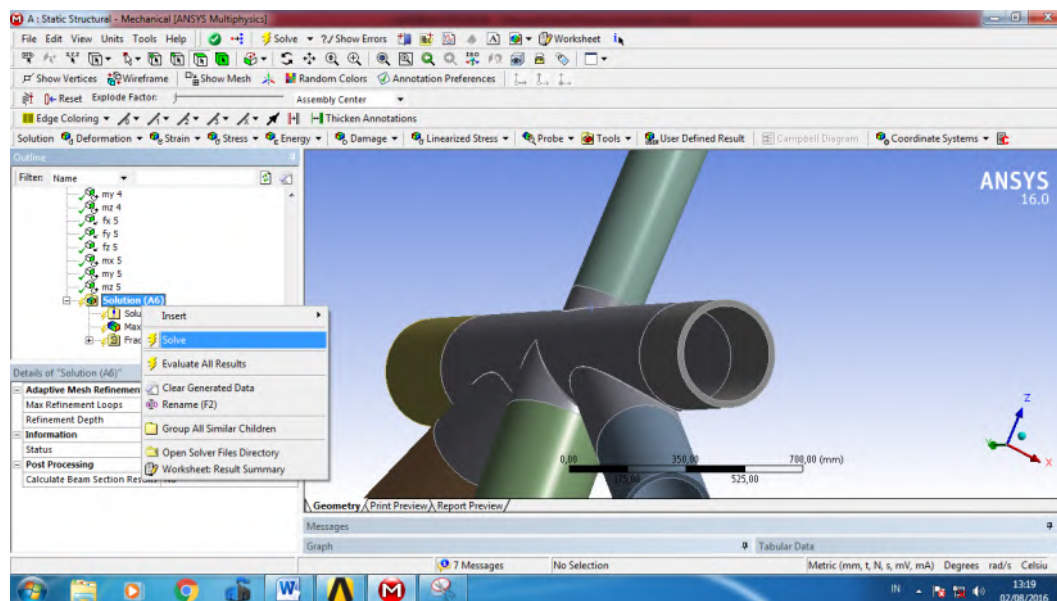


*Input* Pembebanan pada Model dilakukan dengan cara **klik kanan Static Structural (A5) > klik Force/Moment**. Akan muncul tab dialog baru kemudian lakukan hal yang sama seperti *input* kondisi batas.



## 8. Melakukan *Running Solving*

Sebelum melakukan *running solving*, terlebih dahulu dipilih *output* yang diinginkan, misalnya nilai SIF. Pemilihan *output* tersebut dapat dilakukan dengan cara **klik kanan Solution (A6) > klik Insert > klik Fracture Tool**. Akan muncul tab dialog baru "*Fracture Tool*" lalu **klik** bagian *Crack Selection* dan pilih nama *crack* yang ditinjau (nama tetap "*crack*" apabila masih dalam kondisi *default*). Selanjutnya *running solving* dapat dilakukan dengan cara **klik kanan Solution (A6) > klik Solve**.



Tunggu *running solving* selesai, dan hasil analisis dapat diinterpretasikan.



## **BAB 5**

### **PENUTUP**

#### **5.1 Kesimpulan**

Kesimpulan yang didapat dari analisis umur kelelahan *platform* Attaka B ini antara lain :

- a. Nilai *stress intensity factor* pada sambungan kritis *joint 401* pada kedalaman retak ,a, 0,75 mm sebesar 2,15 MPa $\sqrt{\text{m}}$  menggunakan persamaan *surface crack*.
- b. Nilai dari kecepatan perambatan retak pada kedalaman retak ,a, 0,75 mm adalah sebesar 2,7E-09 in/cycle untuk perhitungan dengan *software ANSYS* dan 2,0 E-09 in/cycle untuk perhitungan manual.
- c. Dengan metode *linear elastic fracture mechanics (LEFM)*, diperoleh umur kelelahan *platform* Attaka B dengan menggunakan perhitungan manual sebesar 1,0 E+08 cycle sedangkan dengan *software ANSYS* sebesar 1,1 E+08 cycle.

#### **5.2 Saran**

Saran yang berguna untuk penelitian selanjutnya sebagai berikut :

- a. Perlu dilakukan analisis umur kelelahan yang dilakukan pada mode II & III agar deformasi retak lebih detail.
- b. Untuk memperoleh nilai umur kelelahan yang sesungguhnya, tidak hanya menggunakan pembebanan dari gelombang dominan tetapi harus mempertimbangkan seluruh data sebaran gelombang yang ada.

## DAFTAR PUSTAKA

[www.drillingcontractor.org](http://www.drillingcontractor.org)

[www.offshore-technology.com](http://www.offshore-technology.com)

Akbari, S. A. (2005). *Analisa Umur Kelelahan Tubular Joint Tipe T dengan Menggunakan Metode Elastic Plastic Fracture Mechanics*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

American Bureau of Shipping (ABS). (2003). *Fatigue Assessment of Offshore Structure*.

Annastasia, R. P. (2005). *Analisa Umur Kelelahan Tubular Joint Tipe T yang Memiliki Retak Semi Elliptical pada Chord dengan Metode Linear Elastic Fracture Mechanics*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

API RP-2A-WSD. (2000). *Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platform*.

Broek, D. (1988). *The Practical Use of Fracture Mechanics*. Netherlands: Kluwer Academic.

Chakrabarti, S. K. (2005). *Handbook of Offshore Engineering*. Amsterdam: Elsevier.

Murdjito. (2014). *Overview Bangunan Lepas Pantai*. Surabaya: Jurusan Teknik Kelautan.

Rolfe, S. T., & Barsom, J. M. (1977). *Fracture and Fatigue Control in Structures : Application of Fracture Mechanics*. New Jersey: Prentice-Hall, Inc.

Rolfe, S. T., & Barsom, J. M. (1999). *Fracture and Fatigue Control in Structures : Application of Fracture Mechanics (Third Edition)*. Philadelphia: ASTM.

Syahroni, N. (2014). *Fracture Mechanics – An Introduction*. Surabaya: Jurusan Teknik Kelautan.

### **BIODATA PENULIS**



Nama lengkap penulis ialah Alfino Rifqi Fahmi lahir pada tanggal 01 Juni 1995 di Denpasar, Bali. Penulis memulai jenjang pendidikan di SD N 1 Sidomulyo selama 6 tahun. Setelah lulus penulis melanjutkan pendidikan ke SMP N 1 Delanggu. SMA N 3 Surakarta merupakan sekolah yang menjadi tempat penulis menuntut ilmu setelah lulus dari sekolah menengah pertama. Penulis diterima pada Program Studi S1 Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember melalui SNMPTN jalur tulis. Selama kuliah penulis mengikuti berbagai kegiatan kepanitaan seperti : 30 tahun JTK, ITS *Green Campaign*, Surabaya *Green Action*, OCEANO. Penulis tertarik pada bidang perancangan dan produksi bangunan laut sehingga penulis mengambil judul tugas akhir ini.

Email : [alfinorf@gmail.com](mailto:alfinorf@gmail.com)